



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

PÄIVI LEHTINIEMI
LUONNONKUITUPOHJAISET LUJITTEET KELAAMALLA
VALMISTETUISSA KOMPOSIITEISSA

Diplomityö

Tarkastajat: professori Pentti Järvelä
ja yliopistotutkija Mikael Skrifvars

Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone-, ja materiaali-
tekniikan tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 9. maaliskuuta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

LEHTINIEMI, PÄIVI: Luonnonkuitupohjaiset lujitteet kelaamalla valmistetuissa komposiiteissa

Diplomityö, 66 sivua, 8 liitesivua

Kesäkuu 2011

Pääaine: Muovit ja elastomeerit

Tarkastajat: professori Pentti Järvelä, yliopistotutkija Mikael Skrifvars

Avainsanat: Luonnonkuidut, luonnonkuitukomposiitit, kelaus

Luonnonkuitupohjaiset lujitteet komposiiteissa ovat herättäneet viime aikoina kiinnostusta niiden alkuperän ja hyvien ominaisuuksien takia. Lujitteet ovat edullisia raakamateriaaleina, uusiutuvia, helposti kierrätettävissä ja niitä on runsaasti saatavilla. Lisäksi niillä on alhainen tiheys, korkea jäykkyys ja hyvät lujuusominaisuudet. Yksittäisen pellavakuidun kimmomoduli voi olla jopa 60–80 GPa, kun E-lasikuidun kimmomoduli on noin 70 GPa. Luonnonkuiduilla on kuitenkin myös huonoja puolia. Kuidut eivät ole tasalaatuisia ja niillä on heikko adheesio kestopuoveihin. Ne ovat myös luonteeltaan hydrofiilisiä ja hajoavat yli 200 °C:ssa. Luonnonkuituja on jo laajalti käytetty autoteollisuudessa autojen sisäosien komponenteissa. Näissä sovelluksissa kuitujen hyviä mekaanisia ominaisuuksia ei kuitenkaan hyödynnetä tehokkaasti. Sovelluksissa käytetään usein satunnaisesti järjestäytyneitä lyhyitä kuituja ja matriisi on usein kestopuovi. Tässä työssä tutkitaan luonnonkuituja teknisesti vaativammissa käyttökohteissa, joissa kuidun täytyy kantaa kuormaa. Näin luonnonkuituja voitaisiin käyttää korvaamaan lasikuitua joissakin sovelluksissa.

Työn kokeellisessa osassa valmistettiin luonnonkuitukomposiittiputkia kelaamalla. Kelaus on prosessointimenetelmä, jonka avulla voidaan valmistaa sylinterimäisiä ja pyörähdysymmetrisiä näennäisesti yhdensuuntaisia laminoituja komposiitteja, joilla on korkea kuitupitoisuus. Kuituina käytettiin kahta eri luonnonkuitupohjaista lujitetta (pellava ja viskoosi) sekä lasikuitua vertailumateriaalina. Matriisimateriaaleina käytettiin sekä biopohjaista että tavanomaista epoksia. Luonnonkuitukomposiittien radiaalista vetolujuutta, aksiaalista vetolujuutta ja kimmomodulia, iskulujuutta sekä veden absorptiota vertailtiin lasikuitukomposiittien vastaaviin arvoihin. Myös optista mikroskopiaa ja SEM:ä käytettiin karakterisoinnissa.

Pellavakuitua kelattiin onnistuneesti komposiittiputkeksi. Viskoosikuidun kelaus oli haastavampaa. Kuidusta saatiin kelattua komposiittiputki, mutta se ei ollut tarpeeksi luja koekappaleiden työstöä varten. Ilmeisesti kuidun ja matriisin välinen adheesio on syynä heikkoihin ominaisuuksiin. Pellavakomposiittien ominaisuudet olivat selvästi alhaisemmat kuin lasikuitukomposiittien. Lasikuitukomposiittien lujuuden suhde pellavakomposiittien lujuuteen oli kuitenkin samankaltainen kuin mitä kirjallisuudessa on esitetty. Luonnonkuitujen veden absorptio saattaa aiheuttaa ongelmia. 35 päivää veteen upotuksen jälkeen pellavakomposiitti oli absorboinut jopa 30 p-% vettä, kun vastaavasti lasikuitukomposiitti ei ollut absorboinut juuri yhtään.

Kuidun ja matriisin välinen heikko adheesio on suurin syy alhaisille mekaanisille ominaisuuksille. Komposiitit olivat myös huokoisia ja kuivia, mikä lisää veden absorptiota. Luonnonkuitukomposiittien mekaanisia ominaisuuksia voidaan mahdollisesti parantaa kuitujen ja matriisin oikealla valinnalla, modifioimalla kuituja tai optimoimalla kuitujen kostumista.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials Engineering

LEHTINIEMI, PÄIVI: Natural Fibre Based Reinforcements in Composites

Processed by Filament Winding

Master of Science Thesis, 66 pages, 8 Appendix pages

June 2011

Major: Plastic and Elastomer Technology

Examiners: Professor Pentti Järvelä, Senior Research Fellow Mikael Skrifvars

Keywords: Natural Fibres, Natural Fibre Composites, Filament Winding

Natural fibre based reinforcements in composites have lately aroused interest because of their natural origin and good properties. They are inexpensive as a raw material, renewable, easy to recycle, CO₂-neutral and plentiful. In addition, they have low density, high stiffness, moderate specific strength, and they are non-abrasive for process equipment. Young's modulus of single flax fibre can be as high as 60-80 GPa when Young's modulus of E-Glass fibre is approximately 70 GPa. However, natural fibre composites have some disadvantages. Natural fibres are not uniform and they have poor adhesion to thermoplastics. Also the hydrophilic nature of fibres and degradation in 200 °C can cause problems. Natural fibres are already widely exploited in interior parts of automotive industry. However, in these applications their good mechanical properties are not utilized effectively. Short fibres are usually randomly oriented and matrix material is often a thermoplastic. This thesis studies if natural fibres can be also used in technically more demanding applications where the fibre has to carry some load. Thus, natural fibres could replace glass fibre in some applications.

In the experimental part of the research natural fibre reinforced composite tubes were manufactured by filament winding. The processing method produces usually cylindrical and rotationally symmetrical apparently unidirectional composites which have high fibre content. Two different natural fibre based yarns (flax and viscose) and glass fibre roving as a reference material were examined. Matrix materials for the composites were bio-based epoxy and conventional epoxy. Radial tensile strength, axial tensile strength and Young's modulus, impact strength and water absorption of natural fibre composite specimens were compared with glass fibre composite properties. Optical microscope and SEM were also utilized for characterization.

Flax fibre was successfully wound into a composite tube. The filament winding of viscose fibre was more problematic. Fibre yarn could be wound into a composite tube, but the tube was not strong enough for machining. Adhesion between the fibre and the matrix is probably the reason for that. Properties of the flax composites were notably lower than the properties of glass fibre composites. However, the ratio of the strength values was similar to values presented in literature. The water absorption of the natural fibre composites can be a problem. After 35 days of immersion in water, flax fibre composites absorbed even 30 w-% water, when glass fibre composites absorbed practically nothing.

Poor adhesion between the fibres and matrix was the main reason for the low mechanical properties of natural fibre composites. Composites were also porous and dry, which will induce water absorption. The properties of the natural fibre composites could possibly be improved by right selection of fibres and matrix material, by modifying the fibres or optimizing the wet-out for the natural fibres.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratorion Mikkelin yksikölle syksyn 2010 ja kevään 2011 aikana.

Työn ohjaajina toimivat Mikkelin yksikön alueellinen tutkimusjohtaja Kari Dufva, professori Pentti Järvelä sekä yliopistotutkija Mikael Skrifvars. Haluan kiittää heitä työn aikana saaduista ohjeista, neuvoista ja kannustuksesta työn valmiiksi saattamiseksi. Pentille ja Mikaelille kiitokset myös työn tarkastamisesta. Suuri kiitos myös kehityspäällikkö Kai Hannoselle Miktech:ltä materiaalien hankinnassa avustamisesta sekä neuvoista. Lisäksi kiitos Kimmo Kailalle Amroy Europe Oy:sta.

Kiitos myös Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratorion henkilökunnalle ja työkavereille. Erityiskiitos kelauskoneen asiantuntijalle tutkija Tommi Bergille ja kappaleiden valmistuksessa avustaneelle tutkimusapulaiselle Mikko Saloselle. Lisäksi haluan kiittää neuvoista ja avusta erikoislaboratoriomestari Jyri Öhrlingiä, käyttöinsinööri Sinikka Pohjosta, tutkimusapulainen Matti Hautalaa, tutkija Tiina Hallilaa sekä kaikkia muitakin, jotka ovat antaneet minulle korvaamattomia neuvoja työn edetessä. Tutkija Kauko Östmanille kiitos rengasvetokokeessa avustamisesta.

Kiitos vanhemmilleni, sisaruksilleni ja ystävilleni tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana sekä diplomityötä kirjoittaessani. Suurin kiitos rakkaalle Samille huolenpidosta, läsnäolosta, tuesta ja kannustuksesta niin hyvinä kuin vaikeampinakin päivinä.

Tampereella 13. toukokuuta 2011

Päivi Lehtiniemi

SISÄLLYS

Tiivistelmä.....	II
Abstract	III
Alkusanat.....	IV
Lyhenteet ja merkinnät.....	VII
1. Johdanto.....	1
2. Luonnonkuitut.....	2
2.1. Luokittelu.....	2
2.2. Saatavuus	2
2.3. Kasvikuitujen rakenne	3
2.4. Kuitujen eristäminen	5
2.5. Kuitujen ominaisuudet.....	6
2.5.1. Mekaaniset ominaisuudet.....	6
2.5.2. Hydrofiilisyys.....	8
2.6. Luonnonkuitujen hinta.....	8
2.7. Regeneroidut selluloosakuitut.....	9
3. Kuitujen käsittely ja modifiointi	12
3.1. Luonnonkuitut ja epoksi	12
3.2. Regeneroidut selluloosakuitut ja adheesio	14
4. Luonnonkuitukomposiitit	15
4.1. Kuitulujitetut komposiitit.....	15
4.2. Luonnonkuitukomposiittien edut ja ongelmat	16
4.3. Matriisit.....	16
4.4. Luonnonkuitukomposiittien ominaisuudet	17
4.4.1. Mekaaniset ominaisuudet.....	17
4.4.2. Iskulujuus	19
4.4.3. Kosteuden vaikutus.....	20
4.4.4. Palonkesto	20
4.4.5. Lämpöhajoaminen	21
4.5. Ympäristövaikutukset.....	21
4.6. Jatkuva kuitukomposiitit.....	22
4.7. Sovellukset.....	23
4.7.1. Autoteollisuus.....	23
4.7.2. Esimerkkejä vaativammista sovelluskohteista	24
4.8. Hybridikomposiitit	25
4.9. Tulevaisuuden visioita	25
5. Kelaus.....	26
5.1. Menetelmä.....	26
5.2. Materiaalit	28
5.2.1. Hartsit.....	28
5.2.2. Lujitekuitut	28

5.3. Sovellukset.....	29
5.4. Luonnonkuidut kelauksessa	29
6. Komposiittien valmistaminen	31
6.1. Käytetyt materiaalit	31
6.1.1. Hartsit ja kovetin	31
6.1.2. Kuitulangat.....	31
6.2. Kelauskone.....	32
6.3. Luonnonkuitulankojen kestävyysarviointia	32
6.4. Kappaleiden valmistus.....	33
6.4.1. Lasikuitu- ja pellavakomposiitit	33
6.4.2. Viskoosikomposiitti.....	34
6.5. Kuidun ja matriisin tilavuusosuudet.....	36
7. Testausmenetelmät	38
7.1. DSC	38
7.2. Renkaan vetokoe	38
7.3. Iskukoe.....	40
7.4. Aksiaalinen vetokoe	40
7.5. Mikroskooppinen tarkastelu.....	41
7.6. Veden absorptio.....	41
8. Tulosten tarkastelu	43
8.1. DSC tulokset	43
8.2. Rengasvetokoe	44
8.3. Aksiaalinen vetokoe	46
8.4. Iskulujuus.....	48
8.5. Mikroskooppinen tarkastelu.....	50
8.5.1. Optinen mikroskopia	50
8.5.2. SEM-kuvat	53
8.6. Veden absorptio.....	56
9. Johtopäätökset.....	59
Lähteet.....	61
LIITE 1: Kelauskoneen teknisiä tietoja	i
LIITE 2: Kelauskoneen parametreja valmistetuille putkille	ii
LIITE 3: Iskukokeen tulokset.....	vii
LIITE 4: Aksiaalisen vetokokeen tulokset	viii

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ρ_{comp}	Komposiitin tiheys
ρ_f	Kuidun tiheys
ρ_m	Matriisin tiheys
σ_a	Testikappaleiden näennäinen vetolujuus
a_{cU}	Charpy-iskulujuus
A_m	Kavennettujen kohtien pinta-ala split disk –vetokokeessa
b_N	Näytteen leveys
c	Massan prosentuaalinen muutos vesiabsorptiotestissä
E_c	Iskuenergia
h	Näytteen paksuus
m_1	Testikappaleen massa ennen veteen upotusta
m_2	Testikappaleen massa veteen upotuksen jälkeen
P_b	Maksimivoima split disk-vetokokeessa
T_g	Lasisiirtymälämpötila
V_f	Kuitujen tilavuusosuus komposiitissa
W_f	Kuitujen massaosuus komposiitissa
CO_2	Hiilidioksidi
DSC	Differential Scanning Calorimetry, differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria
FAO	Food and Agricultural Organization
LV	Low Viscosity, matalaviskoosinen
p-%	Painoprosentti
MA	Maleiinihappoanhydridi
MAPP	Maleiinihappoanhydridimodifioitu polypropeeni
NaOH	Natriumhydroksidi
NMMO	N-metyleenimorfoliini-N-oksidi, Lyocell-prosessissa kuitujen valmistuksessa käytetty liuotin
-OH	Hydroksyyli ryhmä
PET	Polyetyleenitereftalaatti
PE-UHMW	Ultra High Molecular Weight Polyethylene
PP	Polypropeeni
RTM	Resin Transfer Molding eli hartsi-injektionmuovaus
S1	Peruskuidun sekundaarisen soluseinän uloin kerros
S2	Peruskuidun sekundaarisen soluseinän keskikerros
S3	Peruskuidun sekundaarisen soluseinän sisin kerros
SEM	Scanning Electron Microscopy, pyyhkäisyelektronimikroskopia
SiO_2	Piidioksidi
UD	Unidirectional, yhdensuuntais(laminaatti)

1. JOHDANTO

Teollisuus haluaa jatkuvasti löytää ympäristöystävällisempiä, kestävämpiä vaihtoehtoja korvaamaan jo olemassa olevia epäekologisia materiaaleja. Mahdollisuus käyttää luonnonkuitulujitteita komposiiteissa on tämän vuoksi herättänyt viime aikoina suurta mielenkiintoa. Muun muassa pellavan, hampun, kenafin ja sisalin käyttöä lujitteena on tutkittu. Näitä kuituja on saatavilla runsaasti, ne ovat edullisia raakamateriaaleina, uusiutuvia ja helposti kierrätettävissä. Niiden hyviä ominaisuuksia ovat alhainen tiheys, korkea sitkeys, vertailukelpoinen ominaislujuus, vähäisempi prosessointilaitteistojen kulutus, erottelun helppous, pienempi energiankulutus valmistuksen aikana ja CO₂-neutraalius. [1]

Luonnonkuitulujitteisia kestopuovikomposiitteja on jo hyödynnetty laajalti autoteollisuuden sovelluksissa, joissa vaaditaan kuitenkin vain keskinkertaisia mekaanisia ominaisuuksia. Näissä sovelluksissa kuidut eivät ole suunnattuja ja näin ollen niiden hyviä mekaanisia ominaisuuksia ei ole hyödynnetty tehokkaasti. [2] Tässä työssä on tarkoitus tutkia mahdollisuuksia käyttää luonnonkuituja vaativammassa ja kuormaa kantavissa sovelluksissa, joissa hartsina on kertamuovi. Tarkoitus on selvittää, voidaanko luonnonkuituja käyttää laajemmin korvaamaan lasikuidun ja hiilikuidun käyttöä joissakin kohteissa tai käyttää niitä rinnakkain perinteisten lujitekuitujen kanssa.

Teoreettisessa osassa perehdytään yleisesti luonnonkuituihin ja luonnonkuitupohjaisiin kuituihin; niiden rakenteeseen, ominaisuuksiin, eristykseen sekä valmistukseen. Lisäksi paneudutaan yleisesti luonnonkuitukomposiitteihin, niiden ominaisuuksiin, sovelluskohteisiin sekä ympäristövaikutuksiin ja mahdolliseen modifiointiin.

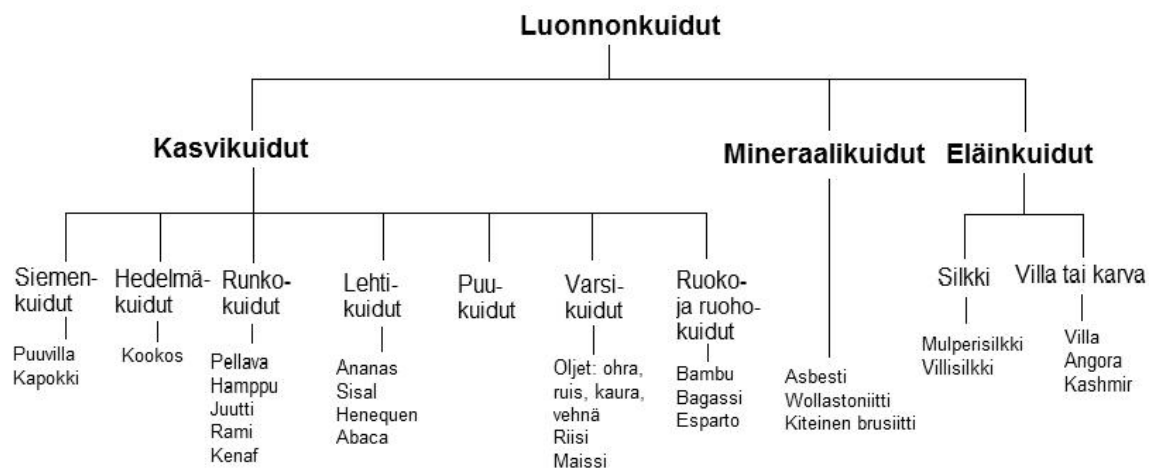
Luonnonkuitukomposiittien valmistusmenetelmäksi valitaan kelaus. Kelauksella valmistetaan usein pyörähdysymmetrisiä kappaleita, joilla on korkea kuitupitoisuus. Kelauksessa pitkät kuidut voidaan suunnata hyvinkin tarkasti, jolloin kappaleille saadaan hyvät mekaaniset ominaisuudet haluttuihin suuntiin. Luvussa 5 tarkastellaan kelausta prosessointimenetelmänä ja selvitetään, onko luonnonkuituja käytetty ennen kelauksessa.

Kokeellisessa osassa käytetään pellava-, viskoosi- ja lasikuituja ja kahta eri epoksi-hartsia komposiittiputkien valmistamisessa. Komposiittien mekaanisia ominaisuuksia kuten lujuutta ja iskulujuutta sekä esimerkiksi veden absorptiota vertaillaan lasikuitukomposiitin arvoihin. Näin voidaan selvittää, kuinka hyvin luonnonkuidut soveltuisivat mekaanisiin komposiitteihin.

2. LUONNONKUIDUT

2.1. Luokittelu

Luonnonkuidut voidaan jaotella sen mukaan, ovatko ne peräisin kasveista, eläimistä tai mineraaleista. Kuvassa 2.1 on esitelty luonnonkuitujen jaottelu alkuperän mukaan. Yleensä luonnonkuidusta puhuttaessa tarkoitetaan kuitenkin nimenomaan kasvikuituja. Näin ollen luonnonkuitua voidaan kuvailla kuitumaiseksi kasvimateriaaliksi, joka on syntynyt fotosynteesin tuotteena. Luonnonkuitukasvit voidaan jakaa primaarisiin ja sekundaarisiin kasveihin sen mukaan, kasvatetaanko niitä yksinomaan kuitujen takia vai tulevatko kuidut sivutuotteena jonkin muun hyödykkeen ohella. Juutti ja hamppu ovat esimerkkejä primaarisista luonnonkuitukasveista kun taas ananas, öljypalmu ja kookos ovat sekundaarisia kuitulähteitä. [3, s. 4; 4, s.45]



Kuva 2.1. Luonnonkuitujen jaottelu. [muokattu lähteestä 4, s.45]

2.2. Saatavuus

YK:n maatalousjärjestön FAO:n (Food and Agriculture Organization) mukaan kasvikuituja (puuvillaa ja puuta ei ole otettu huomioon) tuotetaan maailmanlaajuisesti 4,5-5 miljoonaa tonnia vuosittain. Viljely on keskittynyt Kaakkois-Aasiaan (75 %), missä pääasiassa Intia ja Bangladesh tuottavat juutti-, kookos- ja kenaf-kuitua. Noin 10 % maailmanlaajuisesta tuotannosta on Euroopassa. Ranska on suurin tuottaja, sillä se tuottaa hampun ja pellavan organisoidulla viljelyllä noin kaksi kolmasosaa koko Euroopan kasvikuitujen tuotannosta. Suurin osa Euroopan kuitutuotannosta menee perinteisille markkinoille kuten tekstiileihin (60 % pellavasta) ja erikoispapereihin (90

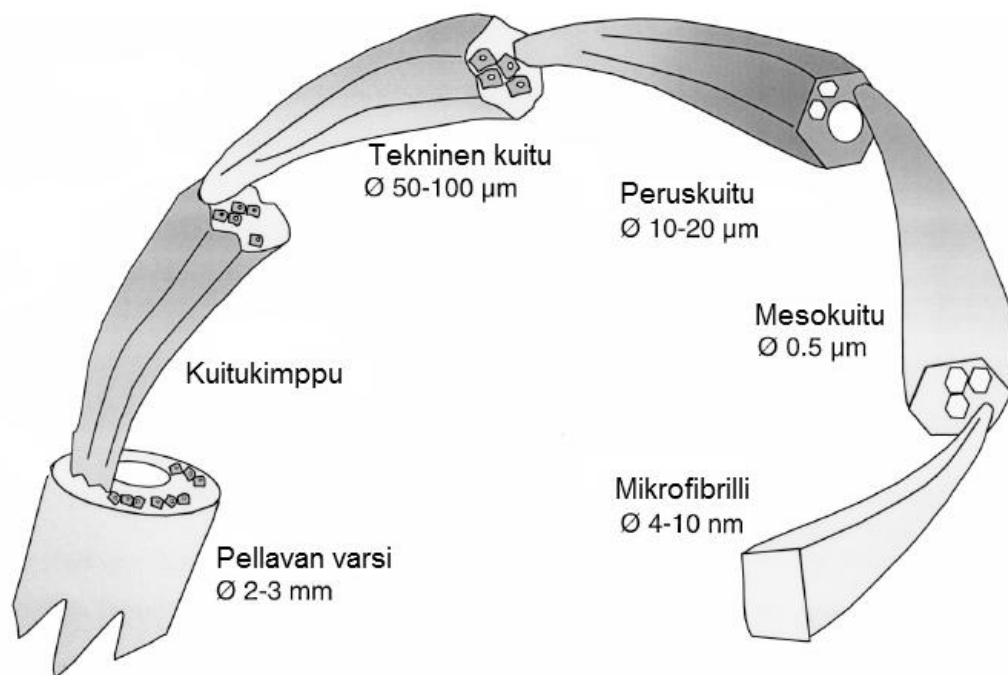
% hampusta). Mahdollisuuksia olisi kuitenkin myös siirtyä enemmän teknisten kuitujen pariin. [5]

Luonnonkuitujen viljelystä ja maankäytöstä ei voida tehdä yleistyksiä. Monet luonnonkuidut eivät ole vaativia maaperän ja ilmasto-olosuhteiden suhteen. Esimerkiksi sisalia voidaan kasvattaa karuissa ja niukoissa ympäristöissä, joten sen viljelyllä ei ole vaikutusta kilpailuun maankäytöstä. Hampu ei tarvitse juuri ollenkaan torjunta-aineita ja sekä hampu että pellava tarvitsevat vain pienen tai keskisuuren määrän lannoitteita. Toisaalta, esimerkiksi puuvillan viljely tarvitsee huomattavan määrän resursseja. [6, s.74]

Öljyn hinnannousu vuodesta 2004 eteenpäin vaikutti erityisesti kaukomailla viljeltävien luonnonkuitujen kuten juutin ja sisalin hintaan. Niiden hinta lähes kaksinkertaistui. Toisaalta taas hampun ja pellavan hintakehitys on ollut suhteellisen vakaata. Niiden hinta on vaihdellut vain 5-10 % keskiarvosta. [6, s. 81]

2.3. Kasvikuitujen rakenne

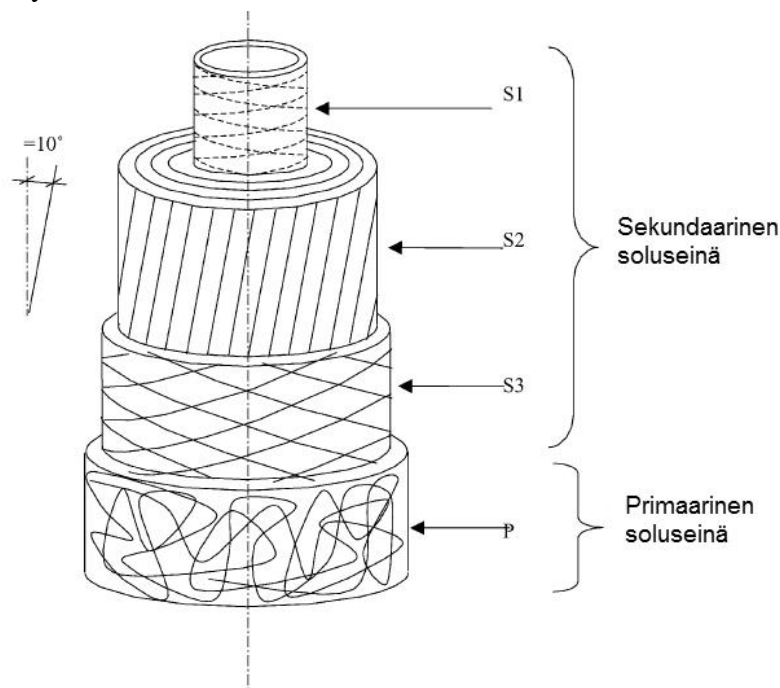
Suurimmassa osassa kasvikuitusovelluksista käytetään kuitukimppuja yksittäisten kuitujen sijaan. Nämä niin sanotut tekniset kuidut koostuvat useista peruskuiduista. Teknisten kuitujen pituus voi olla jopa metrin ja halkaisija tyypillisesti 50–100 μm . Kuitukimppussa yksittäiset kuidut eli peruskuidut ovat limittäin ja niitä sitoo yhteen pektiini, joka määrittää kuitukimppun lujuuden. Kuitukimppun lujuus on huomattavasti alhaisempi kuin yksittäisen kuidun. Teknisistä kuiduista valmistetuissa komposiiteissa on kaksi rajapintaa: yksi teknisen kuidun ja matriisin välissä sekä toinen peruskuitujen välissä kuitukimppussa. Kuvassa 2.2 on esitetty pellavakuidun kuituarkkitehtuuri. [4, s.46–47; 3, s.194]



Kuva 2.2. Pellavakuitujen rakenne. [muokattu lähteestä 7]

Kasvikuidut koostuvat kemiallisesti selluloosasta, hemiselluloosasta, ligniinistä, pektiinistä, vahoista sekä vesiliukoisista ainesosista. Näistä selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini ovat peruskomponentit, jotka määräävät kuitujen fysikaaliset ominaisuudet. [4, s.46]

Peruskuidun rakenne on esitetty kuvassa 2.3. Peruskuidut ovat halkaisijaltaan 10–25 μm ja pituudeltaan 2–5 cm. Peruskuidut ovat yksittäisiä kasvisoluja, jotka koostuvat primaarista soluseinästä, sekundaarista soluseinästä ja lumenista, joka on pieni ja avoin ontelo solun poikkileikkauksen keskellä. Primaarinen soluseinä on suhteellisen ohut, yleensä 0,2 μm paksuudeltaan. Sekundaarinen soluseinä taas muodostaa suurimman osan kuidun halkaisijasta. Se on jakautunut kolmeen eri kerrokseen, jotka ovat muodostuneet orientoituneista kiteisistä selluloosafibrilleistä ja amorfisesta hemiselluloosasta/ligniinistä-alueesta. Sekundaarinen soluseinä antaa kuidulle sen korkean vetolujuuden. Sekundaariset soluseinät eroavat toisistaan koostumukseltaan, selluloosan määrän suhteesta hemiselluloosaan/ligniiniin sekä mikrofibrillien orientaatiolta. Kiteiset selluloosafibrillit ovat orientoituneet kulmassa $+10^\circ$ kuidun akseliin nähden paksuimmassa S2-sekundaarisessa soluseinässä ja muodostavat näin yhdensuuntaisen rakenteen. [7; 8; 4, s.48]



Kuva 2.3. Pellavan peruskuidun soluseinän rakenne. S1 on peruskuidun sekundaarisen soluseinän sisäkerros, S2 keskikerros ja S3 ulkerros. P on primaarinen soluseinä. [muokattu lähteestä 8]

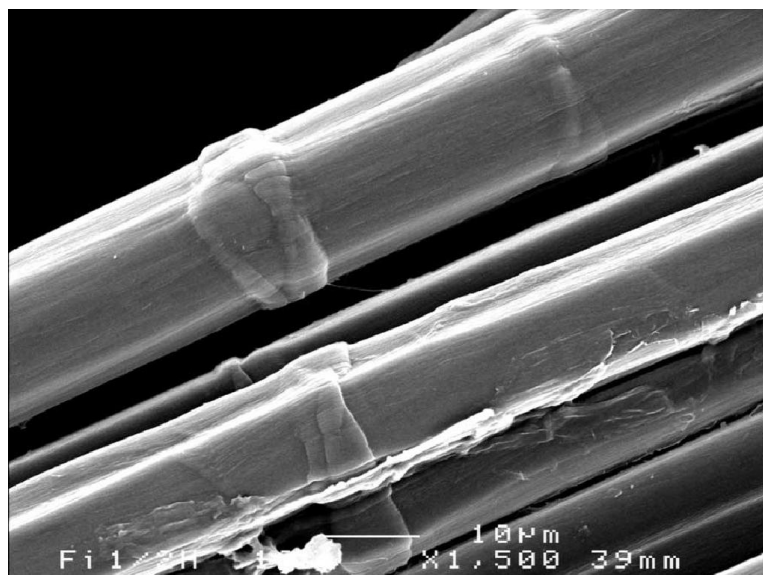
Kasvikuidun rakenne, mikrofibrillien kulma kuidun suuntaan nähden, solujen dimensiot ja kemiallinen koostumus määrittävät kuitujen kokonaisominaisuudet. Yleisesti voidaan sanoa, että kasvikuidun kimmomoduli ja vetolujuus kasvavat, kun kuidun selluloosapitoisuus kasvaa. Selluloosamikrofibrillien orientaatio kuidun akselin suhteen määrittää peruskuidun jäykkyyden. Kasvikuidut ovat joustavampia, kun mikrofibrillit ovat orientoituneet spiraalimaisesti kuidun akselin suhteen. Jos

mikrofibrillit ovat orientoituneet yhdensuuntaisesti kuituakseliin nähden, kuidut ovat joustamattomia ja niillä on korkea vetolujuus. [4, s.49]

2.4. Kuitujen eristäminen

Kuitusadon niiton jälkeen kuidut täytyy erotella ja eristää puisesta solukosta. Prosessi, jossa tekniset kuitukimput erotellaan kasvin varresta ja puisesta solukosta, on nimeltään liuotus. Suurin osa liuotusmenetelmistä pohjautuu mikro-organismien, bakteerien ja sienten käyttöön pektiinipolysakkaridien hajottamisessa kuitujen välistä ja näin kuitukimppujen erottamisessa. Kuitujen erottelulla ja eristämällä on huomattava vaikutus kuitujen saantoon ja lopullisen kuidun laatuun. Erottelu vaikuttaa kuidun rakenteeseen, kemialliseen koostumukseen ja kuidun ominaisuuksiin. Kuidut voidaan eristää kasveista mekaanisin, biologisin, kemiallisin tai fysikaalisin keinoin. Kuitujen erotteluun käytettävä liuotusprosessi nostaa kuitujen vetolujuutta eli niistä tulee lujempia ja jäykempiä. Vastaavasti elastisuus ja venymä pienenevät. [4, s. 54, 135]

Pellavakuidun soluseinät sisältävät useita vikoja, jotka tunnetaan nimellä solmukohta tai nurjahdusnauha. Nämä viat voivat usein olla samassa kohdassa kuitukimpun eri kuiduissa. Kuvassa 2.4 on SEM-kuva (Scanning Electron Microscopy) kuitukimpun samassa kohdassa esiintyvistä nurjahdusnauhoista. Viat syntyvät pellavan mekaanisen kuorintaprosessin aikana. Käsien eristetyissä kuiduissa näitä nurjahdusnauhoja ei käytännössä ole. Viat saattavat vaikuttaa kuidun vetolujuuteen. Vian läheisyydessä syntyy matriisiin jännityskeskittymiä ja nämä toimivat murtumien ydintymiskohtina. Näin ollen erityisesti teknisiin sovelluksiin tulevien kuitujen eristykseen tulisi kiinnittää erityistä huomiota ja minimoida vikojen syntyminen. [9; 3, s.198]



Kuva 2.4. SEM-kuva nurjahdusnauhoista samassa kohtaa pellavan kuitukimppua. [9]

Ketoliuotus (Dew retting) on yleisimmin käytetty liotusprosessi alueilla, joilla on riittävät kosteus- ja lämpötilaolosuhteet. Niiton jälkeen sato jätetään pellolle, kunnes

mikro-organismit ovat erotelleet kuidut kuoresta ja puuaineksesta. Kuoren hajoaminen tapahtuu pääosin sienikasvuston toiminnalla. Prosessi täytyy pysäyttää oikealla hetkellä. Liuotus kestää 3-6 viikkoa ja riippuu paljon sääolosuhteista. Prosessin ennalta-arvaamattomuus johtaa kuitujen laadun vaihteluun. Menetelmän avulla erotetut kuidut absorboivat vähemmän vettä kuin mekaanisesti erotellut. Myös kylmävesiliotusta on käytetty kuitujen erotteluun. Prosessissa anaerobiset bakteerit hajottavat pektiiniä kasveista suurissa vesisäiliöissä. Prosessilla saadaan laadukkaita kuituja, mutta ympäristön saastumisen takia menetelmästä ollaan luopumassa. Eräs menetelmä tuottaa laadukkaita kuituja on entsyymiliotus. Prosessissa käytetään pektiiniä hajottavia entsyymejä erottelemaan kuidut puusolukosta. Menetelmällä saadaan vahingoittumattomia yksittäisiä kuituja, joilla on korkea lujuus. Menetelmä on kuitenkin vasta kokeiluasteella entsyymien, laitteiston ja jäteveden käsittelyn kalleuden vuoksi. [4, s. 54–65]

2.5. Kuitujen ominaisuudet

Luonnonkuitujen ominaisuuksista on vaikea esittää taulukkoa, joka listaisi kaikki ominaisuudet, koska tulokset vaihtelevat eri tutkimusten mukaan johtuen eri kuiduista, kosteusolosuhteista ja testausmenetelmistä. Monissa tapauksissa koeolosuhteita ei ole annettu tai ei ole selvää, minkä tyyppistä kuitua on testattu, toisin sanoen kuitukimppua vai peruskuitua. Luonnonkuitujen mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat useat ulkoiset tekijät. Tämän vuoksi muun muassa sadonkorjuuta, varastointia ja prosessointia on valvottava ja kontrolloitava niin pitkälle kuin on mahdollista, jotta luonnonkuitujen korkea lujuus säilyisi ja laatu olisi tasaista. [4, s.39–40]

2.5.1. Mekaaniset ominaisuudet

Selluloosamolekyylin teoreettisen kimmomodulin on laskettu olevan luokkaa 138 GPa. Teoreettiset vetolujuudet selluloosa I:lle ja selluloosa II:lle (selluloosan eri kiderakenteita) ovat 13–17 GPa ja 9 GPa. Näin ollen teoreettiset mekaaniset ominaisuudet antavat hyvin positiivisen mielikuvan luonnonkuitujen mahdollisuuksista rakenteellisina materiaaleina ottaen huomioon, että luonnonkuitujen selluloosamäärä vaihtelee 45–75 %:n välillä riippuen kasvilajista. Kokeellisesti määritellyt arvot ovat kuitenkin pienempiä kuin teoreettiset. Esimerkiksi kiteisen selluloosan kimmomodulin kokeelliseksi arvoksi on saatu 90 GPa ja suurimmaksi vetolujuusarvoksi 2 GPa. [3, s.271–273] Taulukkoon 2.1 on listattu yleisimpien luonnonkuitujen ja vertailun vuoksi synteettisten kuitujen ja eri materiaalien mekaanisia ominaisuuksia. [3, s.271–273] Murtojännityksen ja kimmomodulin lisäksi on laskettu ominaismurtojännitys ja -kimmomoduli. Tämä tarkoittaa, että lujuus- ja kimmomoduliarvot on jaettu kuitujen massalla eli tässä tapauksessa tiheydellä. Luonnonkuiduilla ominaislujuusarvot ovat usein parempia kuin lasikuidulla.

Luonnonkuitujen mekaanisia ominaisuuksia käyttökohteissa voidaan parantaa, jos käytetään teknisten kuitujen (kuitukimppujen) sijaan niistä eristettyjä peruskuituja.

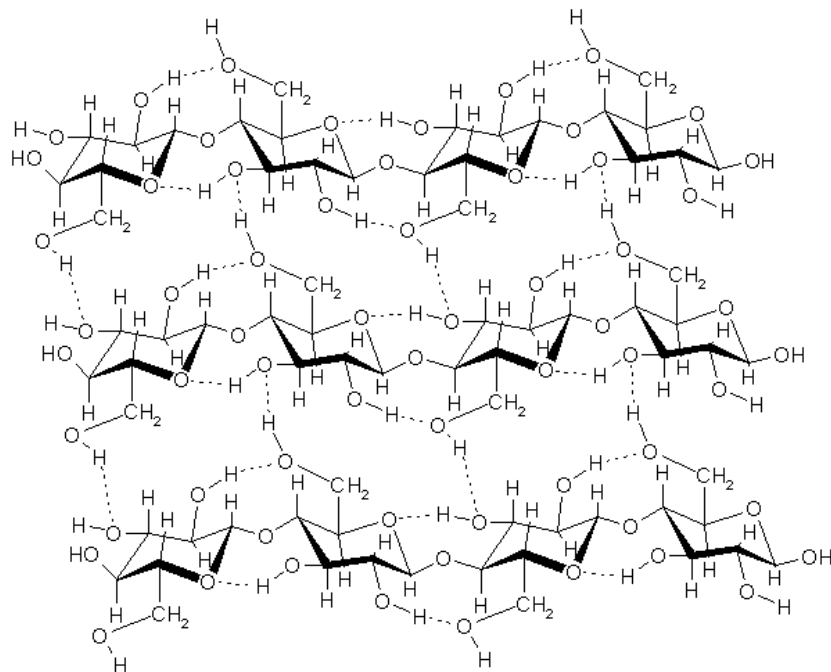
Erityisesti lujuuden parantumiseen peruskuitujen käytöllä on vaikutusta. Myös peruskuitujen eristysmenetelmällä on vaikutusta kuitujen lujuuteen. Esimerkiksi käsin eristetyn peruskuidun vetolujuus on noin 1800 MPa, kun mekaanisesti eristetyn kuidun lujuus on noin 1500 MPa. [10; 11] Toisaalta, jos käytetään teknistä kuitua tai tekstiililankaa, voidaan valmistaa myös pitkäkuitukomposiitteja. [12]

Taulukko 2.1. Luonnonkuitujen ja synteettisten kuitujen sekä eräiden materiaalien mekaanisia ominaisuuksia. [3, s.274; 6, s.30–31; 13; 14; 15; 16; 17; 18]

	Eristys- menetelmä/ kuitutyyppi	Tiheys (g/cm ³)	Veny- mä (%)	Murto- jännitys (MPa)	Ominais- murto- lujuus kNm/kg	Kimmo- moduli (GPa)	Ominais- kimmo- moduli MNm/kg
Puuvilla		1.5-1.6	7.0-8.0	287-597	180 - 400	5.5–12.6	3 – 8
Juutti	Ei mainittu	1.3	1.5-1.8	393–773	300 - 600	26.5	20
Pellava		1.5	2.7-3.2				
	Mekaan./ yksitt. kuitu			1834 ± 900	1200 ± 600	-	-
	Yksittäinen kuitu			1339 ± 486	890 ± 330	54.1 ± 15.1	40 ± 10
	Liutus/ yksitt. kuitu			621 ± 295	420 ± 200	51.7 ± 18.2	35 ± 10
	Ei mainittu			345–1035	230 - 690	27.6	18
Hamppu		1.489	111.6				
	Mekaan./ yksitt. kuitu			1735 ± 10.6	1200	24.9 ± 10.6	17 ± 7
	Kuitukimppu			594 ± 106	400 ± 70	37.5 ± 3.4	25 ± 2
	Kuitukimppu			316 ± 178	210 ± 120	17.2 ± 9.2	12 ± 6
	Ei mainittu			319-750	200 - 500	30 – 60	20 - 40
Rami	Kuitukimppu	1.5	3.6-3.8	950	600	65	43
Sisal	Kuitukimppu	1.5	2.0-2.5	463-840	310 – 560	5.3 - 29.1	4 – 20
Kookos	Kuitukimppu	1.2	30	160–250	130 – 210	3.3-5	3 - 4
Viskoosi		1.52	11.4	593	390	11	7
E-lasikuitu		2.5	2.5	2000-3500	800-1400	70	28
S-lasikuitu		2.5	2.8	4570	1830	86	34
HiPer-tex		2.55	3.1-3.3	2800-3400	1100 - 1340	89 – 91	35
Aramidi		1.4	2.8-3.7	300-3150	210 - 2250	70 – 140	50 – 100
Hiilikuitu		1.76-2.05	1.5-2.0	3500-6000	1700 - 3400	240 – 600	120 – 340
Basaltti		2.63	3.1	4100-4840	1560 - 1840	93 – 110	35 - 42
UHMWPE		0.97	3.5-3.8	2700-3600	2800–3700	89 – 116	92 – 120
Teräs		7.85	10-32	276-2000	35 – 250	190 – 210	24 - 27
Alumiini		2.6-2.8	10-25	230 - 570	80 – 220	70 – 79	25 - 30
Nanosellul		~1.6		800–10000	500 - 6300	134	84
Silkki		1.3		1200–1800	920 - 1400	1-10	0.8 - 8

2.5.2. Hydrofiilisyy

Selluloosa on luonnonkuitujen pääasiallinen komponentti ja sen perusyksikön kemiallisessa rakenteessa on kolme hydroksyyli-ryhmää (OH-ryhmää), jotka voivat muodostaa vetysidoksia makromolekyylin sisällä tai muiden selluloosamolekyylien kanssa. Tämä tekee luonnonkuiduista hydrofiilisiä eli vesihakuisia. Kuvassa 2.5 on esitetty selluloosamolekyylin kemiallinen rakenne ja sen muodostamat vetysidokset. Lasikuidut adsorboivat vettä vain pinnalleen, mutta luonnonkuituihin vesi imeytyy myös sisälle. Absorboituvan veden määrä riippuu ilman suhteellisesta kosteudesta. Lisäksi selluloosan puhtaus vaikuttaa; raaka selluloosa, kuten pesemättömät kuidut absorboivat kaksinkertaisen määrän verrattuna pestyihin kuituihin. Hydrofiilisyydellä on merkitystä, kun kuidut yhdistetään matriisiin. Jos halutaan hyödyntää kuidun hyvät ominaisuudet, on riittävä adheesio erittäin tärkeässä roolissa. [4, s. 182–183, 185]



Kuva 2.5. Selluloosamolekyylin rakenne ja molekyylien sisäiset ja niiden väliset vetysidokset [19]

2.6. Luonnonkuitujen hinta

Taulukkoon 2.2 on kerätty eri luonnonkuitujen hintoja. Tiedot on otettu vuonna 2004 julkaistusta artikkelista. E-lasikuidun hinta oli noin 0,9–2,6 €/kg. Vastaavasti pellavan hinta vaihteli noin 2,3–11,5 €/kg välillä. Pellava oli siten yleensä useita kertoja kalliimpaa kuin lasikuitu. Jalostaminen nostaa kuitujen hintaa merkittävästi. Pellavan hinnan vaihtelu johtuu muun muassa erilaisista käsittelymenetelmistä, erottelumenetelmistä, kuidun kasvatuspaikoista sekä kuidun toimitustilasta. Hampun hinta oli 0,57–1,73 €/kg ja juutin 0,12–0,35 €/kg. Puuvillan hinta oli noin 1,61–4,59 €/kg. [20, s.498]

Taulukko 2.2. Luonnonkuitujen ja synteettisten kuitujen hintoja. [20, s.498, 22, s.187, 28, s.769]

Kuitu	Hinta (€/kg)
Pellava	2.29 - 11.47
Juutti	0.12 - 0.35
Abaca	0.81 - 0.92
Sisal	0.70 - 1.02
Kenaf	0.53 - 0.61
Rami	1.44 - 2.40
Hamppu	0.57 - 1.73
Puuvilla	1.61 - 4.59
E-lasikuitu	0.90 - 2.63
Aramidi	13 - 40
Hiilikuitu	20 - 140

Taulukkoon 2.3 on kerätty luonnonkuitujen ja synteettisten kuitujen hintaesimerkkejä vertailun vuoksi. Esitetyt hinnat ovat vain suuntaa antavia ja niitä tulee käyttää vain vertailuun. Voidaan päätellä, että luonnonkuidut ovat lasikuitua halvempia katkokuitukohteissa ja raakakuituna. Luonnonkuiduista valmistettu lanka taas on kalliimpaa lasikuituun verrattuna; sen hinta lähenee hiilikuidun hintaa.

Taulukko 2.3. Luonnonkuitujen ja synteettisten kuitujen hintaesimerkkejä eri puolivalmisteille [2]

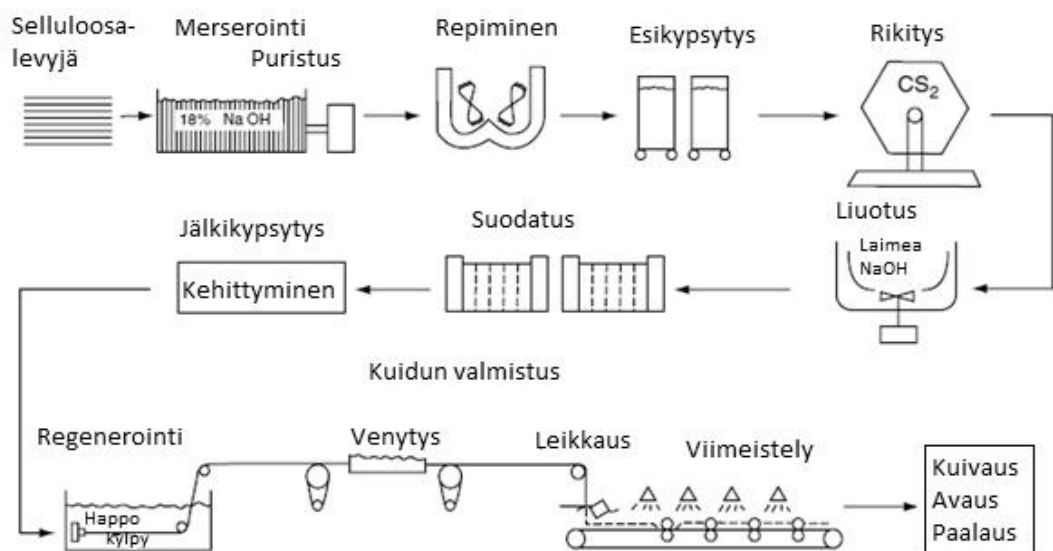
Kuitu	Puolivalmiste	Erityistä	Toimittaja	Hinta (€/kg)
Hamppu	Raakakuitu		Hemcore Ltd (UK)	0.6
Pellava	Raakakuitu		Bio-7-Fibers (DK)	0.6
Lasi	Katkokuitu		Owens Corning (CA)	1.5
Hamppu	Kuitumatto	1500 g/m ²	Bio-7-Fibers (UK)	1.8
Pellava	Kuitumatto	1500 g/m ²	Bio-7-Fibers (UK)	1.8
Lasi	Katkokuitumatto	150 g/m ²	Owens Corning (CA)	2.6
Hamppu	Lanka	50 tex	Linificio e Cananificio (I)	16.3
Pellava	Lanka	60 tex	Linificio e Cananificio (I)	11.6
Juutti	Lanka	140 tex	Himanshu Jute Fab (IN)	1.6
Puuvilla	Lanka	50 tex	Textil Manual Goncalves (PT)	3.4
Lasi	Rovinki	100 tex	Owens Corning (CA)	2.5
Hiili	Rovinki	800 tex	Toray (JP)	18.9

2.7. Regeneroidut selluloosakuidut

Luonnonkuiduilla tarkoitetaan tarkan määritelmän mukaisesti maatalouden avulla tuotettuja kuituja. Vaihtoehtoinen tapa tuottaa kuituja, joilla on samat ominaisuudet, on niin sanottujen keinotekkoisten selluloosakuitujen tuottaminen. [21, s.124] Regeneroidut selluloosakuidut eli muuntokuidut ovat luoneet perustan nykyiselle tekstiiliteollisuudelle. Kuitujen teollinen käyttö alkoi viskoosikuidun valmistuksen

keksimisen jälkeen, 1800-luvun lopulla. Myöhemmin, muut prosessit kuten Lyocell-NMMO (N-metyylimorfoliini-N-oksidi) ja nestekidepohjaiset prosessit ovat parantaneet kuiduntuotannon ympäristövaikutuksia ja lisänneet selluloosapohjaisten kuitujen kysyntää. [21, s.296–298] Regeneroidut selluloosakuidut tuovat samoja etuja komposiitteihin kuin luonnonkuidutkin. Lisäksi niiden mekaanisissa ominaisuuksissa on vähemmän eräkohtaisia poikkeavuuksia kuin kasviperäisillä luonnonkuiduilla ja ne eivät aiheuta hajuhaittoja kun sopivia käsittelymenetelmiä käytetään. [23, s.240]

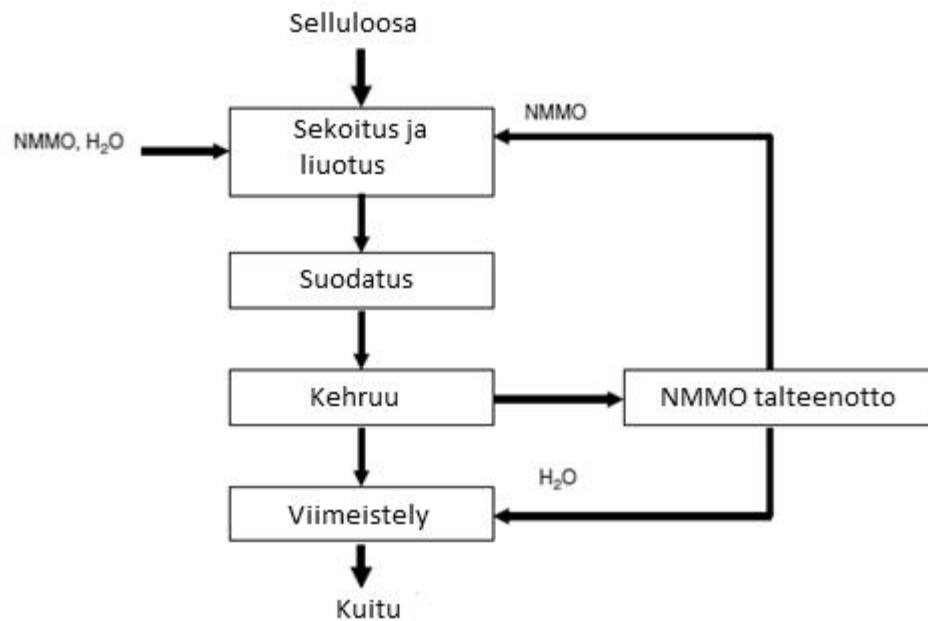
Viskoosi on yksi monipuolisimmista ihmisen kehittämistä kuiduista. Tämä johtuu siitä, että kuitua voidaan muunnella kemiallisesti ja rakenteellisesti siten, että voidaan hyödyntää sen lähtöaineen, selluloosan, hyviä ominaisuuksia. Valmistusprosessi koostuu monista vaiheista, joista jokaista on kontrolloitava halutun lopputuotteen saamiseksi. Prosessointiparametreja muuntamalla voidaan viskoosille saada aikaan vaihtelevia ominaisuuksia, joista kuitu on hyvin tunnettu. Viskoosiprosessissa lyhytkuituinen selluloosa (puumassa) muunnetaan pitkiksi säikeiksi, joiden pituutta, paksuutta, poikkileikkausmuotoa ja muita fysikaalisia ominaisuuksia voidaan kontrolloida. Prosessissa selluloosa muunnetaan natriumselluloosaksantaatiksi, joka liukenee emäksiseen liuokseen. Tämä tekee mahdolliseksi polymeerin märkäkehruun kuiduksi tai kalvoksi. Menetelmä on hyväksytty maailmanlaajuisesti ja sitä on käytetty paljon. Prosessi kuitenkin sisältää useita vaiheita ja aiheuttaa saastumista. [20, s.668, 711–722] Kuvassa 2.6 on kuvattuna viskoosin valmistusprosessin vaiheet.



Kuva 2.6. Viskoosikuidun valmistusprosessi [muokattu lähteestä 20, s. 734]

Lyocell-prosessissa regeneroituja selluloosakuituja tuotetaan liuottamalla selluloosa suoraan orgaaniseen, aproottiseen (happo-emäsreaktioihin osallistumaton) liottimeen, N-metyylimorfoliini-N-oksidiin (NMMO). Derivatisointia eli johdoksenmuodostusta ei sisälly prosessiin, joten vain liuottimena toimiva yksi kemikaali on palautettava ja puhdistettava uudelleenkäyttöä varten. Prosessi on

yksinkertainen ja NMMO on myrkytön, harmiton ympäristölle sekä biohajoava jätevedenkäsittelyssä. Vaikka menetelmän periaatteet ovat olleet tiedossa jo pidempään, menetelmä on kaupallistettu vasta 1990-luvulla. Lyocell-kuidun mekaaniset ominaisuudet ovat hieman paremmat kuin viskoosikuidulla. [21, s.126, 132] Kuvassa 2.7 on esitetty Lyocell-prosessin vaiheet.



Kuva 2.7. Lyocell prosessi [muokattu lähteestä 20, s. 676]

3. KUITUJEN KÄSITTELY JA MODIFIOINTI

Komposiittien suorituskyky riippuu yksittäisten komponenttien ominaisuuksista ja rajapinnan yhteensopivuudesta. Niinpä luonnonkuituja käsitellään ja modifioidaan, koska halutaan homogenisoida kuitujen ominaisuuksia, kontrolloida polymeraatiota ja kiteisyyttä, parantaa kuidun ja matriisin välistä adheesiota, ehkäistä kosteuden vaikutusta ja parantaa tulenkesto-ominaisuuksia. Näitä ominaisuuksia voidaan kontrolloida käyttämällä erilaisia kuitujen erottelumenetelmiä, mutta jälkikäteen tehdyt kuitujen käsittelyt ovat tehokkaampia. Selluloosaa sisältämättömät komponentit täytyy poistaa, jotta varmistetaan kuitujen yhteensopivuus ympäröivän matriisipolymeerin kanssa. Alkalikäsittely, kuitujen peseminen tai keittäminen 2-10 %:ssa natrium-, kalium- tai litiumhydroksidi-liuoksessa poistaa ei-halutut komponentit. Tämä voi parantaa merkittävästi kuidun pintaominaisuuksia ja mekaanisia ominaisuuksia. [4, s.65]

Kuidun ja matriisin välinen adheesio riippuu muun muassa kuidun sekä matriisin pinta-energioista ja kuidun kemiallisista esikäsittelyistä kuten saapumistilasta, alkalikäsittelystä, asetyloinnista ja silaanikäsittelystä. Adheesioon vaikuttavat kestumuvien tapauksessa myös adheesioaparantajat kuten maleiinihappoanhydridimodifioitu polypropeeni. Kertamuovimatriisien verkottumisaste, kestumuvien lasisiirtymälämpötila T_g verrattuna huoneenlämpötilaan sekä matriisin kutistuminen kuitujen päälle komposiitin prosessoinnin aikana vaikuttavat myös adheesioon. [22, s. 156]

Luonnonkuidut muodostavat lujemman rajapinnan kertamuovien kanssa verrattuna kestumuveihin. Kertamuoveilla saavutetaan paremmat kostumisolosuhteet johtuen alhaisesta viskositeetista. Kuidut pääsevät parempaan kontaktiin matalan molekyyli-massan hartsien kanssa, koska hartsit pääsevät tunkeutumaan kuitujen epätasaisen pinnan läpi tai jopa soluseiniin asti. Lisäksi, kuiduilla ja kertamuovimatriisilla on usein samantyyppinen pinnan kemiallinen luonne, joten kovetuksen aikana pintojen välille muodostuu kemiallisia sidoksia. [23, s.202–203]

3.1. Luonnonkuidut ja epoksi

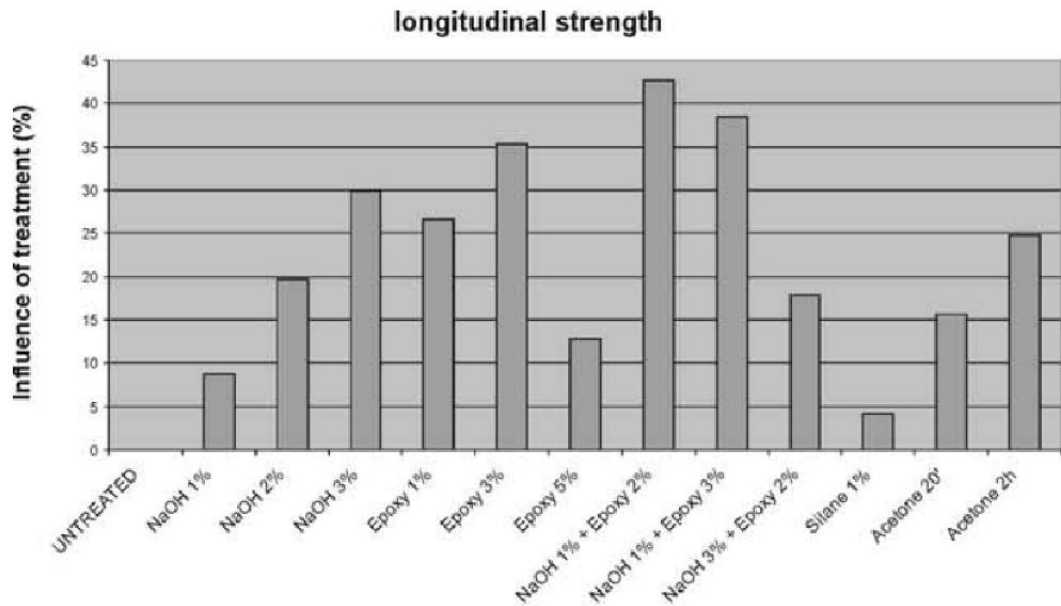
Kertamuovien ja luonnonkuitujen välisen adheesioaparantamismenetelmistä on olemassa vähemmän tietoa verrattuna tietoon kestumuvien ja luonnonkuitujen rajapinnan muokkaamisesta. Yleensä oletetaan, että epoksi tarttuu hyvin ligno-selluloosakuituihin. Luonnonkuitujen hydroksyyli-ryhmillä on hyvä adheesio epoksin kanssa. On kuitenkin tutkittu, että satunnaisesti järjestäytyneessä pellava/epoksi-komposiitissa kuitujen käsittely 3-aminopropyyli-2,2,6,6-tetrametyyli-5-oksotetrahydro-2H-pyridi-3-karboxylaattisilaanilla paransi vetolujuutta

53 MPa:sta 63 MPa:iin ja kimmomodulia 7,9 GPa:sta 9.8 GPa:iin. Tutkimuksessa kokeiltiin eri käsittelyiden vaikutusta pellavan ja epoksin adheesioon. Tutkittavat käsittelymenetelmät olivat alkalikäsittely (NaOH), silaanikäsittely, isosyanaattikäsittely, silaani/ epoksi-kostutuskäsittely, luonnonkumilateksipinnoitus ja epoksoitu luonnonkumilateksi-pinnoitus. Käsittelyiden vaikutukset komposiittien mekaanisiin ominaisuuksiin on esitetty taulukossa 3.1. Ominaisuuksien parantuminen on selkeää, joten epoksin ja pellavan oletettu hyvä tartunta ei olekaan aivan itsestään selvää. Pellavakuidun pinnalla on ohut kerros luonnonvahoja, jotka vähentävät reaktiivisten hydroksyyli-ryhmien saavutettavuutta kuidun pinnalla. Vahakerros poistamalla voidaan parantaa kuitujen pinnan hydrofiilisyyttä ja kohottaa kuidun pinnan reaktiivisuutta. Ainoastaan lateksikäsittelyillä ei saavutettu parantuneita lujuusominaisuuksia. Iskulujuus kuitenkin kasvoi selkeästi luonnonkumipinnoituksen jälkeen. [24; 25]

Taulukko 3.1. Kemiallisten käsittelyjen vaikutus pellava/epoksi-komposiitin mekaanisiin ominaisuuksiin. [24]

Kuitu	Vetolujuus (MPa)	Vetomoduli (GPa)	Iskulujuus (kJ m ⁻²)
Käsitlemätön	53.40 ± 1.85	7.86 ± 0.83	10.47 ± 1.11
NaOH (10%)	60.18 ± 1.83	9.21 ± 0.50	13.09 ± 1.59
3-aminopropyylitrietoksilaani	62.54 ± 1.63	9.83 ± 0.42	8.41 ± 0.20
Fenyyli-isosyanaatti	61.04 ± 1.71	9.55 ± 0.73	8.65 ± 0.61
Silaani/Epoksi	57.79 ± 2.22	8.59 ± 0.81	13.69 ± 0.60
Luonnonkumi	-	2.89 ± 0.11	18.43 ± 0.40
Epoksoitu luonnonkumi	52.31 ± 1.91	8.48 ± 0.43	9.69 ± 0.50

Käsittelymenetelmiä on olemassa neljää eri tyyppiä; liuotusmenetelmät (vahanpoisto, ligniinin poisto, valkaisu), pinnoitus (oksastuspolymerointi ja kytkentäaineet), kostutus laimealla hartsilla sekä näiden menetelmien yhdistelmät. Eräässä pellava/eposikomposiittitutkimuksessa käytettiin alkalisointia esimerkkinä liuotusmenetelmistä ja silaanikäsittelyä pinnoitusmenetelmistä. Pellavakuituja kostutettiin myös laimealla epoksilla ja yhdistelmämenetelmänä käytettiin alkalisointia ja epoksikäsittelyä. Kuvassa 3.1 on esitetty käsittelyjen vaikutus komposiitin pitkittäiskuitusuunnan lujuuteen. Tulokset on saatu kolmipistetaivutuskokeesta ja ne on esitetty lujuusarvon prosentuaalisena muutoksena verrattuna käsitlemättömään pellava/epoksi-komposiittiin. Alkalisoinnilla voidaan saavuttaa 30 %:n lujuuden kasvu ja laimealla epoksiliuoksella (3 %) 35 %:n kasvu. Alkalisointi poistaa kuiduista pektiiniä ja laimea epoksi tunkeutuu vähemmän viskoosisena mikrohuokosiin ja yksittäisten kuitujen väliin. Suurin kasvu lujuudessa saavutetaan yhdistämällä nämä menetelmät. Tämä menetelmä on itse asiassa kolmen eri liuoksen (alkali, epoksi ja aseton) yhdistelmä, jossa epoksi on laimennettu. Jo itse käsittely puhtaalla asetonilla lisää lujuutta, mutta voi vaurioittaa kuituja. Silaanikäsittely parantaa myös lujuutta, mutta ei merkittävästi. [26]



Kuva 3.1. Eri käsittelymenetelmien vaikutus pellava/epoksikomposiitin pitkittäiskuitusuunnan lujuuteen verrattuna käsittelemättömään komposiittiin [26]

3.2. Regeneroidut selluloosakuidut ja adheesio

Regeneroitujen selluloosakuitujen adheesio on parantamista on tutkittu lähinnä kestopuolimatriiseihin ja tietoa on vähän saatavilla. Kestopuolimeihin adheesio oletetaan olevan parempi, sillä sekä hartsi että kuitu ovat hydrofiilisiä.

Erilaisia keinoja parantaa regeneroitujen selluloosakuitujen ja matriisin välistä rajapintaa on kehitetty. Erityisesti Lyocell-kuidun (NMMO-pohjaisen) fibrillointia on tutkittu. Muita menetelmiä ovat muun muassa dispersion vaikutus, matriisin modifiointi sekä selluloosapohjaisen matriisin käyttäminen. Näissä tutkimuksissa on kuitenkin käytetty kestopuolimatriisia. [27]

4. LUONNONKUITUKOMPOSIITIT

Huoli luonnonvarojen riittämisestä ja kierrätyskysymykset ovat johtaneet kiinnostukseen uusiutuvia raaka-aineita kohtaan. Tutkijat ovat yrittäneet löytää vaihtoehtoja, joiden käyttöönotto on taloudellisesti kannattavaa ja ympäristöystävällistä, CO₂-neutraalia tai biohajoavaa joissakin tapauksissa. Tämän tuloksena viime vuosina on kehitetty uudentyyppisiä komposiitteja, jotka perustuvat kasvikuitujen käyttöön. Luonnonkuitulujitetut komposiitit tarjoavat hyvän mekaanisen suorituskyvyn ja ympäristöystävällisyyden. Niitä hyödyntävien sovellusten määrä lisääntyy jatkuvasti. [3, s. 67–68]

4.1. Kuitulujitetut komposiitit

Komposiittimateriaali on keinotekoinen monifaasimateriaali, joka on suunniteltu siten, että yhdistelmämaalilla saavutetaan paremmat ominaisuudet kuin yksittäisillä faaseilla. Monet komposiitit on kehitetty, jotta voitaisiin parantaa mekaanisia ominaisuuksia kuten jäykkyyttä ja sitkeyttä. Suurin osa komposiiteista koostuu vain kahdesta faasista; matriisista, joka on jatkuva ja ympäröi toista faasia sekä lujitefaasista, joka on epäjatkuva. Komposiittien ominaisuudet riippuvat läsnä olevien faasien koostumuksista, niiden määrästä sekä lujitefaasin partikkelien muodosta, koosta, jakautumisesta ja orientaatiosta. Komposiitit voidaan jakaa partikkelilujitettuihin, kuitulujitettuihin ja rakenteellisiin komposiitteihin. [28, s. 528–529]

Kuitulujitettujen komposiittien tavoitteena on saada aikaan korkea lujuus ja jäykkyys yhdistettynä keveyteen. Matriisin tehtävinä kuitulujitetuissa komposiiteissa on sitoa kuidut yhteen, olla sitkeä, suojata kuituja vaurioilta sekä erotella kuidut toisistaan ja näin ollen estää hauraiden murtumien eteneminen kuidulta toiselle. Kuitujen tehtävänä on toimia jäykkinä ja lujina kuormankantajina. Matriisi kantaa vain hyvin pienen osan kuormasta. Kuitulujitetut komposiitit jaotellaan kuidun pituuden mukaan. Liian lyhyet kuidut eivät paranna lujuutta merkittävästi. Kuitulujitettujen komposiittien mekaaniset ominaisuudet riippuvat kuidun ominaisuuksista sekä siitä, miten hyvin matriisi pystyy siirtämään kuorman kuiduille. Tähän vaikuttaa merkittävästi kuidun ja matriisin välinen rajapinta. Jotta matriisi voisi siirtää kuorman kuiduille, on kuitujen oltava riittävän pitkiä. Kun kuitujen pituus kasvaa, lujittava vaikutus tehostuu. [28, s. 535–536, 546]

4.2. Luonnonkuitukomposiittien edut ja ongelmat

Luonnonkuidut kuten pellava, hamppu, banaani, sisal, öljypalmu ja juutti tarjoavat monia teknis-taloudellisia ja ekologisia etuja verrattuna synteettisiin kuituihin kuten lasikuituun. Niillä voidaan lujittaa sekä kesto- että kertamuoveja. Luonnonkuitukomposiittien etuja ovat:

- Alhainen hinta raakakuituna
- Kuitujen pieni tiheys
- Kuiduilla yleensä hyvä ominaislujuus
- Kuitujen korkea jäykkyys
- Matala abraasio prosessoinnissa ja työstössä, joten säästöjä työkalukustannuksissa
- Kuitujen myrkyttömyys, joten ei terveydellistä haittaa työntekijöille
- Hyvä kuidun ja matriisin adheesio, kun käytetään polaarisia matriiseja
- Hiilidioksidineutraalius
- Hyvä saatavuus
- Matala energiankulutus valmistuksen aikana
- Kuidut biohajoavia
- Hyvä terminen ja akustinen eristyskyky
- Korkea sähköinen resistanssi

Luonnonkuitujen käyttöön komposiiteissa liittyy myös haasteita. Ongelmia voivat aiheuttaa seuraavat ominaisuudet:

- Kuidut eivät ole tasalaatuisia
- Kuitujen heikko palonkesto
- Kuitujen hajoaminen yli 200 °C:ssa
- Kuitujen hydrofiilinen luonne, joka voi aiheuttaa veden imeytymistä ja ominaisuuksien heikentymistä sekä adheesio-ongelmia kestopuuvien kanssa
- Heikompi pitkäaikaiskestävyys kuin esimerkiksi lasikuitulujitteilla
- Kuitujen huono adheesio hydrofobisiin kestopuuvimatriiseihin, mikä vaatii kalliita kuitujen tai matriisin käsittelyjä
- Työntekijöiden altistumien homeille, mikrobeille ja pölylle
- Kuitujen hajoaminen (lahoaminen)
- Kuitujen jalostamisessa teknisesti toimivaksi lujitteeksi kehitettävää [3, s. 68, 306]

4.3. Matriisit

Luonnonkuitulujitetut kestopuovikomposiitit häviävät mekaanisten ominaisuuksien osalta kertamuovipohjaisille, sillä kuidun ja kestopuovimatriisin välille kehittyy vain heikko adheesio ja itse kestopuovien mekaaniset ominaisuudet ovat alhaisemmat kuin kertamuoveilla. Paljon työtä on käytetty kestopuovien ja luonnonkuitujen adheesio-

parantamiseksi; muun muassa maleiinihappoanhydridillä oksastettu polypropeeni on parantanut mekaanisia ominaisuuksia, mutta siltikään kestopuovipohjaiset luonnonkuitukomposiitit eivät sovellu kuormaa kantaviin sovelluksiin. Kertamuovit (erityisesti epoksi) voivat olla kestopuoveihin verrattuna kalliimpia, mutta niillä on paremmat mekaaniset ominaisuudet ja niitä voidaan prosessoida menetelmillä, joiden avulla komposiiteille saadaan korkea kuitupitoisuus. Lisäksi näillä valmistusmenetelmillä kuitujen orientaatiota on helpompi kontrolloida. Kertamuovien käytöllä ei merkittävästi heikennetä komposiittien ekologisuutta, varsinkin jos mietitään termistä polttamista. [29]

Kertamuovit silloittuvat kovetuksen aikana. Kovetuksessa tarvitaan lämpöä ja kovettaja-ainetta. Kertamuovit ovat yleensä hauraita huoneenlämpötilassa ja niillä on alhaiset murtumissitkeysarvot. Kertamuoveja ei voida muovata uudelleen lämmittämällä; ne vain hajoavat tai palavat. Silloittuminen tuo mukanaan kuitenkin paljon hyviä puolia. Kertamuoveja voidaan käyttää korkeammissa lämpötiloissa kuin kestopuoveja, sillä kertamuoveilla on korkeampi lasisiirtymälämpötila T_g sekä paremmat virumisominaisuudet. Kertamuovien kemikaalienkesto on myös parempi kuin kestopuovien. [23, s.194]

Epoksit tarjoavat monia etuja verrattuna muihin kertamuoveihin. Epoksien ominaisuuksia voidaan vaihdella valitsemalla erilaisia lähtöaineita kuten kovettajia tai modifiointiaineita. Epokseista ei synny helposti haihtuvia sekundaarisia tuotteita ja niillä ei tapahdu merkittävää kutistumista. Epoksit kestävät hyvin kemikaaleja sekä liuottimia, niiden veden absorptio on vähäistä ja niiden adheesio moniin täyteaineisiin ja kuituihin on hyvä. Epoksien heikkouksia ovat suhteellisen korkea hinta ja pitkä kovetusaika. [23, s.196]

4.4. Luonnonkuitukomposiittien ominaisuudet

Luonnonkuitukomposiittien mekaaniset ominaisuudet riippuvat useista parametreista, kuten kuitujen tilavuusosuudesta, sivusuhteesta, kuidun ja matriisin välisestä adheesiosta, prosessointimenetelmästä, kuormituksen siirtymisestä rajapinnalla sekä kuitujen orientaatiosta. Raportoitaessa luonnonkuitukomposiittien mekaanisista ominaisuuksista, olisi otettava huomioon kuitujen määrän, eri käsittelymenetelmien ja kytkentäaineiden vaikutus ominaisuuksiin. [30]

4.4.1. Mekaaniset ominaisuudet

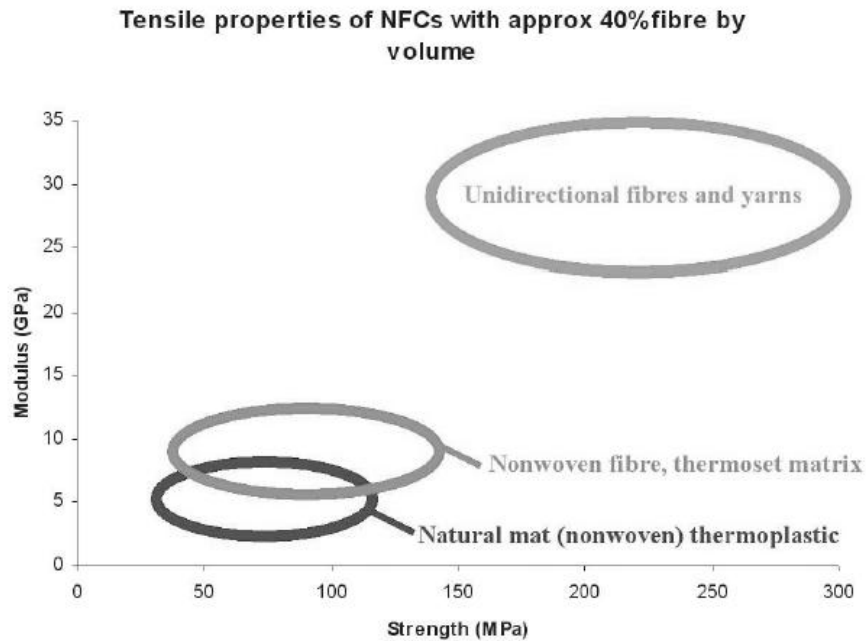
Van de Weyenberg et al. [26] raportoi pellava/epoksi käsittelemättömän yhdensuuntaisen UD-komposiitin kimmomoduliksi 28 GPa ja vetolujuudeksi 133 MPa, kun kuitujen tilavuusosuus komposiitissa oli $V_f = 0,40$. Vertailun vuoksi, lasikuitu/epoksi yhdensuuntaiselle UD-komposiitille on raportoitu [31] kimmomodulin arvoksi 31 GPa, kun kuitujen tilavuusosuus oli $V_f = 0,48$. Tämä osoittaa, että pellavakuidulla voidaan päästä lähelle lasikuidun jäykkyysarvoja. [3, s.196–197]

Madsen on kerännyt eri lähteistä luonnonkuitulujitetuille komposiiteille tyypillisiä lujuusominaisuuksia. [2] Arvot ovat esitettynä taulukossa 4.1. Taulukon arvoista selviää, että satunnaisesti järjestäytyneet kuidut saavat aikaan vain keskinkertaiset lujuusominaisuudet kimmomodulin jäädessä alle 6 GPa ja murtolujuuden alle 60 MPa. Lisäksi vain murtolujuus kasvaa, kun kuidun ja matriisin rajapintaa modifioidaan maleiinihappoanhydridillä yhteensopivammaksi. Kun kuidut ovat suuntautuneita, lujuusominaisuudet ovat huomattavasti paremmat ja kuitujen tilavuusosuus suurempi. Tämä voidaan todeta myös kuvasta 4.1, jossa on vertailtu UD-komposiittien ja satunnaikuitumattokomposiittien mekaanisia ominaisuuksia. Komposiittien ominaisuudet ovat siis parhaat, kun käytetään suunnattuja kuituja satunnaisesti orientoitujen sijaan. Verrattuna lasikuitulujitettuihin komposiitteihin, luonnonkuitukomposiitit eivät pääse samoihin lukemiin varsinkaan murtolujuuden osalta. Jäykkyysominaisuudet ovat hyväksyttävät, mutta murtolujuuden parantamiseksi olisi tehtävä jotakin. Luonnonkuitujen alhaisempi tiheys kompensoi kuitenkin tuloksia, sillä sen ansiosta luonnonkuitukomposiittien ominaisjäykkyys ja -lujuus ovat verrattavissa lasikuidun vastaaviin arvoihin. [2] Lasikuidut ovat SiO_2 :n eli piidioksidin kolmiulotteisia verkostoja, kun taas luonnonkuidut ovat anisotrooppisia orientoituneita selluloosamikrofibrillejä sisältäviä rakenteita. Anisotrooppinen rakenne johtaa murtumiseen mikronurjahduksen avulla. Myös muilla korkeasti orientoituneilla polymeerikuiduilla kuten aramidilla ja polyeteenikuidulla voidaan havaita samanlaista käyttäytymistä. [29]

Taulukko 4.1. Luonnonkuitukomposiittien lujuusominaisuuksia. MA = maleiinihappoanhydridi. PP = polypropeeni, PET = polyetyleenitereftalaatti [2]

	Orientaatio	Matriisi	Vf	Jäykkyys (GPa)	Murtolujuus (MPa)	Lähde
Hamppu	Satunnainen	Novolakka	($W_f = 0.40$)	2.7	33	[32]
	Satunnainen*	Novolakka	($W_f = 0.40$)	2.4	37	
	Järjestäytynyt	PET	0.48	27.6	277	[2]
Pellava	Satunnainen	PP	0.14	3.4	36	[33]
	Satunnainen*	PP	0.14	3.4	39	
	Järjestäytynyt	PP	0.51	28.7	288	[2]
Juutti	Satunnainen	PP	0.30	5.2	40	[34]
	Satunnainen*	PP	0.30	5.2	61	
	Järjestäytynyt	Polyesteri	0.50	27.2	225	[35]
Puu	Satunnainen	PP	0.27	4.2	28	[36]
	Satunnainen*	PP	0.27	4.2	52	
Lasi- kuitu	Satunnainen	PP	0.20	5.4	77	[37]
	Järjestäytynyt	PP	0.60	45.0	1020	[38]

*MA:a käytettiin kompatibilisaattorina



Kuva 4.1. Luonnonkuitukomposiittien veto-ominaisuuksien vertailua eri tavalla orientoitujen kuitujen kesken. [39]

4.4.2. Iskulujuus

Materiaalin iskuominaisuudet kertovat sen kyvystä absorboida ja johtaa pois energiaa iskun tai shokkikuormituksen aikana. Käytännössä iskuolosuhteet voivat vaihdella kappaleen äkillisestä putoamisesta nopeisiin törmäyksiin ja materiaalin vaste voi vaihdella paikallisesta vauriosta täydelliseen hajoamiseen. Jos materiaali on herkkä muodonmuutosnopeudelle, sitä ei voida suunnitella vastustamaan iskuvauriota sen staattisten mekaanisten ominaisuuksien perusteella. Myös vaurioitumismoodit voivat olla hyvin erilaisia iskuolosuhteissa kuin staattisissa testeissä. [40, s. 303]

Komposiittien iskulujuus riippuu paljon kuidun ja matriisin rajapinnan ominaisuuksista. Iskuenergia johtuu pois sidosten irtoamisella, kuidun ja/tai matriisin vaurioitumisella ja kuidun ulosvedolla. Iskuvaurio alkaa laminoiduissa komposiiteissa yleensä poikittaisella matriisin murtumisella, jota seuraa delaminaatio, kuidun irtoaminen matriisista ja kuidun murtuminen. Kuidun murtuminen johtaa vähemmän energiaa pois kuin kuidun ulosveto. Murtuminen on yleistä komposiiteissa, joilla on luja rajapintasitoutuminen. [41; 42]

Luonnonkuitukomposiittien iskulujuus on yleensä suuruudeltaan vain murtoosan verran vastaavien lasikuitukomposiittien iskulujuudesta samoilla tilavuusosuuksilla. Näin ollen iskulujuus on yksi luonnonkuitukomposiittien heikkous. Alhainen lujuus voi johtua luonnonkuiduissa olevista nurjahduksista. Nurjahdukset tarjoavat särölle edullisia ydintymispisteitä. [3, s.199] Luonnonkuitukomposiittien iskuominaisuudet ovat riippuvaisempia vioista kuin lasikuitukomposiittien. Luonnonkuitujen mikrorakenne on erilainen, sillä ne ovat muodostuneet mikrosäikeistä ja ovat siten vain osittain suuntautuneita kuormitussuuntaan nähden. Loput kuidut ovat

satunnaisesti järjestäytyneitä. Rajapintasitoutumisen parantaminen ei luonnonkuitukomposiittien tapauksessa johda aina sitkeämpään rakenteeseen. Jännityskonsentraatioita voidaan havaita kuituvikojen läheisyydessä ja ne voivat edetä matriisin vaurioitumisella. [42]

Satunnaisesti suuntautuneella hammppukuitumatolla lujitetun polypropeenin Charpy-iskulujuus (energian absorptio/poikkileikkausala) oli erään tutkimuksen mukaan $\sim 25 \text{ kJ/m}^2$ ja satunnaisesti suuntautuneella sisalkuiduilla lujitetun polypropeenin $\sim 28 \text{ kJ/m}^2$. Vastaavasti satunnaissuuntaisen lasikuitumatto/polypropeenin Charpy iskujuu-
 us oli $54,12 \text{ kJ/m}^2$. Luonnonkuitulujitettujen komposiittien iskujuu-
 us on siten selvästi pienempi kuin lasikuidun vastaava. Kuitenkin, jos jaetaan arvot tiheydellä, saadaan vertailukelpoisempia tuloksia. [41]

4.4.3. Kosteuden vaikutus

Yksi merkittävä ongelma luonnonkuitulujitteisten polymeerikomposiittien laajemmalla käytöllä on selluloosakuidun hydrofiilinen luonne ja näin ollen komposiittien kosteusherkkyyys. Kosteutta imeytyy luonnonkuituihin 5-10 % tai enemmän. Tämä voi johtaa mittasuhteiden muutoksiin komposiiteissa ja on ilmeistä, että myös mekaaniset ominaisuudet muuttuvat. Vesimolekyylit kuidun ja matriisin rajapinnalla tuhoavat tai heikentävät rajapinnan sidoksia korvaamalla ne vähemmän vahvoilla vetysidoksilla ja absorboituneilla vesimolekyyleillä. Kestomuovien tapauksessa, kosteus heikentää prosessoitavuutta ja johtaa huokoiseen rakenteeseen. Kosteuden vaikutusta voidaan vähentää käsittelemällä kuituja kemiallisesti tai oksastaa muun muassa vinyylipolymeereillä. On kuitenkin mahdotonta täysin estää veden imeytyminen kuituihin kapillaarisesti kuitujen päästä. Valmistustekniikkaa onkin siten optimoitava, jotta vedenabsorptio saataisiin mahdollisimman vähäiseksi ja komposiitista tulisi laadukas. [30; 23, s.213]

4.4.4. Palonkesto

Luonnonkuitujen tulenarkuus ja erityisesti luonnonkuitukomposiittien palamisesta syntyvä lämpö ovat huolenaiheita. Lisäksi palonkesto arvioidessa otetaan huomioon syttymisaika ja roihuamisnopeus (flame velocity). Palonkestäviä komposiitteja suunniteltaessa matala ligniinipitoisuus on avainasemassa. Akryylikomposiittien tapauksessa pellavalla (2 % ligniiniä) lujitetulla komposiitilla kesti kaksi kertaa kauemmin syttyä kuin sisalilla (10 % ligniiniä) lujitetulla. Pellava- ja juuttilujitetulla akryylillä kestää molemmilla kauemmin syttyä kuin lasikuitulujitetulla akryylillä. Roihuamisnopeudet hamppu/epoksi-komposiiteille ovat kaksi kertaa nopeampia kuin lasikuitu/polyesterilla. Kun palonestoaineeksi lisättiin aluminiumhydroksidia, roihuamisnopeus putosi alle puoleen lasikuitu/polyesteriin verrattuna. [3, s.201]

4.4.5. Lämpöhajoaminen

Selluloosakuidun lämpöhajoamista alkaa tapahtua lämpötilassa 150 °C veden haihtumisella ja värinmuutoksilla. Yli 220 °C:ssa mekaaninen lujuus alkaa laskea rajusti ajan suhteen. Hajoaminen alkaa selluloosakuitujen amorfisella alueella. Kasvikuitujen komponenttien kuten selluloosan ja ligniinin hajoaminen synnyttää huokosia komposiitin sisälle, mikä johtaa mekaanisten ominaisuuksien heikentymiseen. Hajoamisesta johtuen luonnonkuitukomposiitteihin soveltuvat matriisimateriaalit rajoittuvat alle 200 °C:ssa prosessoitaviin. Prosessoinnin aikana tapahtuvaa hajoamista on vältettävä, jotta optimoidaan komposiitin ominaisuudet. Kertamuovien tapauksessa ongelmana on kovetusvaihe, jossa kuidut altistuvat korotettuihin lämpötiloihin. Vain muutamien minuuttien altistuminen yli 200 °C:n lämpötilassa voi johtaa voimakkaaseen hajoamiseen ja rakenteellisen eheyden menetykseen. Eräässä tutkimuksessa uunisäilytyskokeet ovat kuitenkin osoittaneet, että kymmenen minuuttia 200 °C:ssa tai 3 minuuttia jopa 220 °C:ssa aiheuttavat vain vähäistä vetolujuuden heikkenemistä. [43; 44, s.162; 23, s.200–201]

4.5. Ympäristövaikutukset

Monissa sovelluksissa kuten autoteollisuudessa luonnonkuitukomposiitit ovat lasikuitukomposiitteihin verrattuna ympäristön näkökulmasta suotuisampia. Tämä johtuu muun muassa siitä, että luonnonkuitujen tuottamisella on pienemmät ympäristövaikutukset kuin lasikuidun tuottamisella. Taulukossa 4.2 on esitetty lasikuitumaton ja kahden luonnonkuitumaton valmistukseen tarvittava uusiutumattoman energian määrä. Nähdään, että lasikuidun tuotanto vaatii huomattavasti enemmän energiaa. Luonnonkuitukomposiiteissa kuidun prosentuaalinen tilavuusosuus on suurempi, joten usein vähemmän ympäristöystävällistä matriisimuovia tarvitaan vähemmän. Luonnonkuiduista valmistetut komposiitit ovat myös kevyempiä, joten erityisesti autoteollisuudessa saavutetaan etua, kun voidaan käyttää polttoainetta tehokkaammin ja vähentää päästöjä. Lisäksi luonnonkuidut voidaan polttaa ja vapauttaa näin energiaa. [45]

Ympäristön kannalta saavutettu etu kuitenkin katoaa, jos luonnonkuitulujitettujen komposiittien elinikä jää huomattavasti lasikuitulujitettujen komposiittien eliniän alle. On myös otettava huomioon käytettävien kuitujen koostumus ja käyttötapa sekä sovellus, jossa kuitujen ympäristötehokkuutta tutkitaan. Eräässä tutkimuksessa vertailtiin pellavakuitukomposiittien ja lasikuitukomposiittien (matriisimateriaalina polypropeeni) ympäristövaikutuksia kahdessa eri sovelluskohteessa, autoteollisuudessa sekä ei-autoteollisuudessa (esimerkiksi toimistotuoli). Tässä tutkimuksessa pellavakuitukomposiiteilla saavutettiin huomattavasti pienemmät ympäristövaikutukset lasikuitukomposiitteihin verrattuna autoteollisuudessa, jossa jäykkyys ja paino olivat kriittiset tekijät. Sitä vastoin isku- ja vetolujuuskriittisessä ei-autoteollisuuden sovelluksessa lasikuitulujitteisella

komposiitilla saavutettiin pienemmät ympäristövaikutukset. Tämä johtui siitä, että pellavaa tarvittiin enemmän kuin lasikuitua, jotta voitiin taata lasikuituun verrattavissa oleva toiminnallisuus. Tämä kertoo siitä, että komposiittien elinkaarianalyysin tulokset ovat hyvin riippuvaisia sovelluskohteesta eikä tiukkaa rajaa tietyn materiaalin paremmuudesta voida vetää. [45; 22 s.43] Luonnonkuitukomposiittien ympäristöetu saavutetaan usein enemmän sekundaarisella vaikutuksella, kuten massan vähentymisellä, kuin kuidun ”vihreällä” alkuperällä. [25]

Taulukko 4.2. Uusiutumattoman energian tarve lasikuitu- ja luonnonkuitumattojen valmistuksessa [45]

Uusiutumattoman energian tarve (MJ/kg)					
Lasikuitu-matto		Pellavakuitu-matto		China reed kuitu	
Raaka-aineet	1.7	Siementen tuotto	0.05	Viljely	2.5
Sekoitus	1.0	Lannoitteet	1.00	Kasvin kuljetus	0.40
Kuljetus	1.6	Kuljetus	0.90	Kuitujen eristys	0.08
Sulatus	21.5	Viljely	2.00	Kuitujen jauhatus	0.40
Kehruu	5.9	Kuitujen erotus	2.70	Kuidun kuljetus	0.26
Maton valmistus	23.0	Maton valmistus	2.90		
Kokonaistarve	54.7	Kokonaistarve	9.55	Kokonaistarve	3.64

4.6. Jatkuvakuitukomposiitit

Suurin osa sovelluksista käyttää joko lyhyitä, ruiskuvaluun soveltuvia kuituja tai ei-kudottuja kankaita, jotka perustuvat järjestäytymättömien kuitujen käyttöön. Tämän vuoksi komposiittien mekaaniset ominaisuudet ovat heikot ja ne eivät sovi käytettäväksi rakenteellisissa kohteissa. Kuitujen mekaanisia ominaisuuksia ei oteta tehokkaasti käyttöön, kun kuidut ovat järjestäytyneet satunnaisesti. [29]

Teknisesti vaativampiin kohteisiin tarvitaan pitkiä tai jatkuvia kuituja. Rakenteellisten luonnonkuitukomposiittien kehityksen tärkeimpänä haasteena on kehrättävien luonnonkuitujen tuottaminen lasikuituun nähden kilpailukykyisellä hinnalla. [39]

Jos valmistetaan lujitekuitua tekstiilisovelluksiin, luonnonkuitulangan tulee olla suhteellisen kierteistä, jotta sen lujuus riittäisi tekstiilien prosessointiin. Jos taas erittäin kierteisiä lankoja kostutetaan polymeerihartsilla, lankojen lujuus saattaa heikentyä merkittävästi ja näin ollen aiheuttaa komposiitin lujuuden heikkenemisen. Tämä johtuu siitä, että kierteiset langat eivät ole vedon suunnassa. Kun kierteisyys kasvaa, lankojen läpäisevyys lisäksi heikkenee ja kostuminen ei onnistu helposti. Näin ollen kierteisyydelle on olemassa optimaalinen suuruus ja komposiittien ominaisuuksien parantamiseksi se tulisi pitää mahdollisimman alhaisena. Kierteen täytyy olla kuitenkin niin suuri, että se kestää langanvalmistusprosessin ja komposiitin valmistusprosessin aiheuttamat voimat. [29]

Monista nykyisin saatavilla olevista edullisista luonnonkuituista, kuten kuoritusta hampusta, ei voida tehokkaasti valmistaa lankaa, sillä kuiduilla ei ole tarvittavaa koheesiota. Kuidut eivät ole tasalaatuisia ja mukana on paljon lyhyitä kuituja. Perinteisesti nimenomaan langan kierteinen rakenne aiheuttaa kuitujen välille kitkaa, joka pitää kuidut yhdessä. Kestomuovisovelluksia varten lankojen rakennetta on muokattu kietomalla kierteettömien kuitujen ympärille yleensä polypropeenista valmistettu lanka, joka pitää kuidut yhdessä. Eräässä tutkimuksessa erilaisista pellavalangoista ja epoksista valmistettiin komposiitteja ja todettiin, että kiedotulla pellavasta valmistetulla komposiitilla oli ylivoimaisesti suuremmat veto- ja taivutusominaisuudet kuin kolmella erilaisella kierteisellä pellavalla lujitetulla komposiitilla. [46]

4.7. Sovellukset

Luonnonkuitulujitteisia komposiitteja käytetään useissa kohteissa. Sovellukset vaihtelevat matalia mekaanisia ominaisuuksia vaativista kohteista kuten biohajoavista kukkaruukuista tai kertakäyttötuotteista vaativampiin esineisiin kuten jauhinlevyn pidikkeisiin, salkkuihin ja ruokailuvälineisiin. Rakennusteollisuudessa luonnonkuitukomposiitteja käytetään paljon niiden hyvän termisen ja akustisen eristyskyvyn takia. Vaativampia käyttökohteita ovat muun muassa huonekalut, puutarhakalusteet, sisäpihalankut ja autoteollisuuden rakenteelliset komponentit. Luonnonkuituja on myös yritetty käyttää mekaanisissa kuormaa kantavissa kohteissa. Esimerkiksi 3 metriä pitkässä tuuligeneraattorin roottorilevyssä on käytetty pellavakuituja lujitteena. Tämä todistaa, että luonnonkuituja voidaan hyödyntää myös vaativammissa sovelluksissa. [6]

Kertamuoveihin perustuvien luonnonkuitukomposiittien kaupallinen tuotanto on vielä huomattavasti vähäisempää kuin kestomuovikomposiittien. Alalla on kuitenkin jatkuva kiinnostus luonnonkuituja kohtaan. Kertamuovikomposiittien valmistustekniikat tulevat perinteisen komposiittiteollisuuden parista. Muun muassa käsinlaminointi ja ruiskulaminointi sekä RTM (Resin Transfer Molding eli hartsi-injektiomuovaus), infuusio ja puristusmuovaus ovat mahdollisia valmistusmenetelmiä luonnonkuitukomposiiteille. [47]

4.7.1. Autoteollisuus

Monet autoteollisuuden komponentit valmistetaan luonnonkuitulujitetuista komposiiteista. Luonnonkuitujen käyttö on lisääntynyt autoteollisuuden lainsäädännön muuttuessa. Tuottajien on käytettävä materiaaleja uudelleen. Autoteollisuuden luonnonkuitulujitteiset materiaalit perustuvat suurimmissa määrin polypropeenin ja polyesterin (lähinnä PET:n) lujittamiseen pellavalla, hampulla ja juutilla. Koska luonnonkuitujen tiheys on alhaisempi kuin lasikuitujen, luonnonkuitujen käytöllä saavutetaan autoteollisuudelle tärkeää painon alentumista. Lisäksi joidenkin luonnonkuitujen ominaiskimmomoduli on suurempi kuin lasikuidun vastaava, joten

luonnonkuiduilla voidaan saavuttaa paremmat jäykkyysominaisuudet. Luonnonkuidut vaimentavat myös paremmin ääntä kuin lasi- tai hiilikuidut. Motivaationa luonnonkuitujen käytölle on kuitenkin ollut enemmän hinta ja markkinointi kuin tekniset vaatimukset. Näin ollen sovelluskohteet ovat rajoittuneet pääasiassa matalaa lujuutta vaativiin kohteisiin autojen sisäosissa. Luonnonkuituja käytetään muun muassa ovien sisäpaneelissa, istuinten selkänojissa ja sisäkattopaneelissa. Näiden komponenttien puutteita ovat hydrofiilisyyden ja heikko iskulujuus. Tutkimusta on kuitenkin tehty materiaalien mekaanisten ja kosteusominaisuuksien parantamiseksi, jotta niitä voitaisiin käyttää myös autojen ulko-osien komponentteina. [4, s.256; 3, s.221]

4.7.2. Esimerkkejä vaativammista sovelluskohteista

Plasmor on ollut mukana NavEcoMat-projektissa, jossa tarkoituksena on valmistaa korkean teknologian biokomposiittirakenteita perustuen luonnonkuituihin ja biohartseihin. Kehityksen tuloksena valmistettiin kajakki, jossa lasikuitu oli korvattu pellavakuidulla. Tulokset eivät ole vielä täysin tyydyttäviä käyttöönoton ja ulkonäön suhteen, mutta jo lähellä haluttua. (Kuva 4.2) [48]

Npsp Composieten valmisti Flaxcat-katamaranin rungon käyttäen pellavaa ja epoksia materiaaleina. Runko valmistettiin teknisistä pellavamatoista, jotka painettiin yhteen ohuemman rakenteen aikaansaamiseksi ja injektioitiin hartsilla. (Kuva 4.2) [49]



Kuva 4.2. Pellavakuituinen kajakki [48] sekä pellava/epoksi-katamaranin runko [50]

Myös huonekaluja on valmistettu paljon luonnonkuitulujitteista. Francois Azambourg julkisti LIN 94 – malliston, jossa käytetään pellavakuitua komposiittien lujitteena. Tuoli (kuva 4.3.) on tehty 94 % uusiutuvista materiaaleista ja hartsista 80 % on kasviperäistä epoksihartsia. Tuoli on vielä prototyyppiasteella ja se varustetaan alumiinijaloilla. [51]

Johann Museeuw kehitti polkupyörän, jonka rungossa lujitteena on käytetty 50 % pellavaa ja 50 % hiilikuitua. (Kuva 4.3) Hiilikuitu antaa halutun jäykkyyden ja pellava absorboi tärinää, joka johtuu vioista tien päällystyksessä. Tällä hetkellä Museeuw Bikes on kehittämässä pellavalujitettuja pyörän vanteita. [52]



Kuva 4.3. Pellavakuituinen tuoli [51] ja 50/50 pellava/hiilikuitu pyörän runko [53]

4.8. Hybridikomposiitit

Luonnonkuitujen yhdistäminen synteettisten kuitulujitteiden kanssa parantaa luonnonkuitukomposiittien mekaanisia ominaisuuksia. Myös kosteuden absorptio vähenee hybridisaation vaikutuksesta, sillä veden imeytyminen esimerkiksi lasikuituun on hyvin vähäistä. Yhdistelmäkomposiitteja valmistettiin 20–25 % täyteaineesta, 30–35 % sisal-kuidusta ja 8–10 % lasikuidusta käyttäen polyesteriä matriisina. Komposiitin lujuus- ja taivutusominaisuudet paranivat verrattuna vain sisal-kuidulla lujitettuun komposiittiin. Huomattiin, että sisal-kuidut murtuivat ensin ja lasikuidut niiden jälkeen. [4, s.272]

4.9. Tulevaisuuden visioita

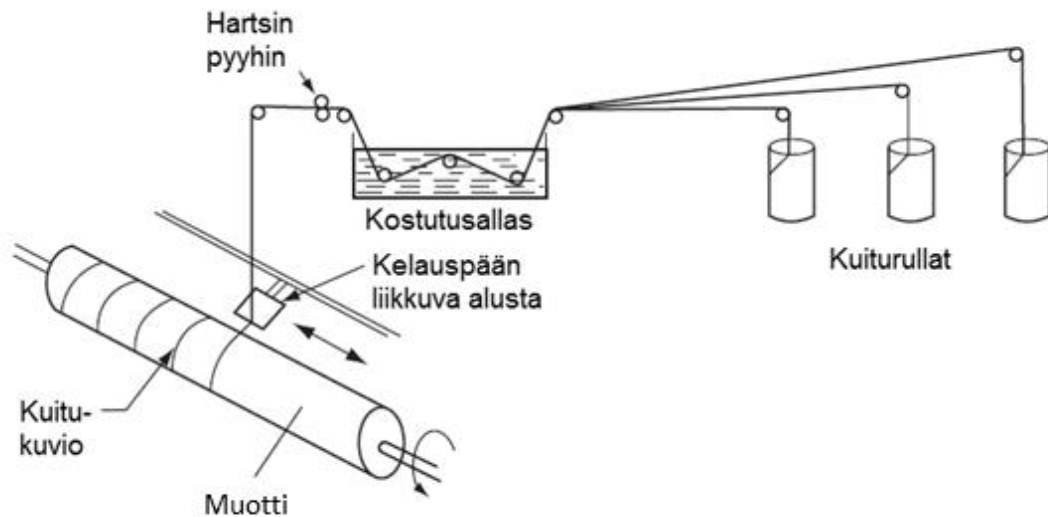
Tällä hetkellä luonnonkuitukomposiittien markkinat ovat painottuneet rakennus- ja autoteollisuuden pariin. Kehityksellä ja suorituskyvyn parantamisella uusia sovelluskohteita tulee todennäköisesti lisää. Mekaanisten ominaisuuksien parantaminen esimerkiksi uusien kuitutyypin, prosessoinnin ja lisäaineiden avulla lisääisi luonnonkuitujen käyttöä myös teknisesti vaativampiin kohteisiin. Myös edullisten biohajoavien hartsien kehitys lisääisi luonnonkuitujen käyttöä, sillä näin monet synteettiset komposiitit voitaisiin korvata täysin ekologisella vaihtoehdolla. Potentiaalisia luonnonkuituja ja prosessointivaihtoehtoja on olemassa runsaasti varmistamaan, että oikea kuitu päättyy oikeaan sovellukseen. Investointeja kuitenkin tarvitaan tutkimukseen ja kehitykseen, jotta laajeneva biokomposiittiteollisuus pääsisi vauhtiin. [47]

5. KELAUS

Kelauksella (Filament Winding) valmistetaan muovimatriisikomposiitteja kuormaa kantaviin rakenteellisiin sovelluksiin. Puolivalmis tuote valmistetaan kelaamalla matriisihartsilla kostutettuja kuituja, kuitukimppuja, teippiä tai kankaita kontrolloidusti kiristettynä pyörivän tuurnan eli kelausmuotin pinnalle kerros kerrokselta. Kelattu kappale muunnetaan valmiiksi tuotteeksi kemiallisin ja termisin keinoin. Yleisin menetelmä on lämpökäsittely. Muotti poistetaan kovettumisen jälkeen, jos se ei ole osa rakennetta. [54, s.456]

5.1. Menetelmä

Kuvassa 5.1 on esitetty kelausprosessi. Kuiturovinkeja tai -touveja vedetään useista rullista nestemäisen hartsikylvyn läpi. Hartsin lisäksi kostutusallas voi sisältää katalyyttiä ja muita lisäaineita, kuten pigmenttejä ja UV-absorbaattoria. Kuitujen kireyttä kontrolloidaan kuituohjainten avulla. Juuri ennen kuin kuitu menee hartsikylvpyyn, kerätään rovingit yleensä ryhmäksi lankapöydän tai teräskamman avulla. Hartsikylvyn jälkeen kostutetut rovingit ohjataan pyyhinlaitteen läpi, jossa poistetaan ylimääräinen hartsi ja kontrolloidaan hartsin määrää rovingissa. Kun rovingit on kostutettu ja pyyhitty, ne kerätään yhteen tasonauhaksi kelauspään avulla ja johdetaan muotin pinnalle. Kelauspää on yleensä sijoitettu liikkuvalla alustalle, joka liikkuu eteen- ja taaksepäin yhdensuuntaisesti muotin kanssa. Alustan liikkumisnopeutta ja muotin pyörimistä säädellään siten, että muodostuu haluttuja kelauskuvioita. Perinteisessä kelausprosessissa tehdään kierteistä kelauskuviota. Vaihtelemalla kuidun kelauskulmaa eli rovingin kulmaa muotin akselin suhteen voidaan kontrolloida lujitekuidun suuntaa kuitukerroksessa ja komposiitin seinämän paksuutta. Näin lujitekuidut voidaan asettaa tarkasti ja saada komposiitille haluttuja ominaisuuksia tiettyihin suuntiin. Säättämällä kelauspään syöttönopeutta ja muotin pyörimisnopeutta, voidaan kelauskulmaa vaihdella melkein 0°:sta (poikittainen kelaus) lähes 90°:seen (vannekelaus, hoop). [40, s.408-409; 54, s.456]



Kuva 5.1. Kelausprosessin periaate. [muokattu lähteestä 40, s.409]

Kun kappaleelle on saatu haluttu paksuus, kelattu kappale kovetetaan muotin päällä. Tämän jälkeen muotti poistetaan valmiista tuotteesta. Se voidaan tehdä käyttämällä kokoontaitettavia, kutistuvia, jakautuvia tai ilmatäytteisiä muotteja kappaleille, joiden päädyt kelataan integroidusti. Prototyypeille tai pienille sarjoille voidaan käyttää myös liukenevaa kipsiä, eutektisia suoloja tai matalan sulamispisteen seoksia. Muottimateriaalin täytyy kestää painaumuksia, ylläpitää asetettua kelauskireyttä ja säilyttää muotonsa kovetuksen aikana korotetussa lämpötilassa. [40, s.410–411]

Valmistusmenetelmän avulla kuitu voidaan sijoittaa tarkasti haluttuun paikkaan ja prosessi on toistettavissa. Etuna on myös se, että voidaan käyttää pelkästään jatkuvaa kuitua ilman liitoksia ja kuidut voidaan orientoida helposti kuormituksen suuntaisesti. Menetelmällä voidaan valmistaa myös suuria ja paksuseinäisiä kappaleita. Muotin kustannukset saadaan yleensä pidettyä alhaisina ja kokonaiskustannuksetkin ovat yleensä pieniä suurissa sarjoissa valmistettaessa, sillä ei tarvita paljon työvoimaa. Lisäksi kuitua ja hartsia voidaan käyttää muodossa, jossa niiden hinta on alhaisin. Kallistakin kuitua voidaan yhdistää halvempaan hartsiin ja saada aikaan suhteellisen edullinen lopputuote. Kuitujen asettelu on nopeaa ja lopputuotteilla on korkea kuitupitoisuus. [55, s. 537–538; 56 s.1-6 - 1-11]

Kelauksen ongelma on muun muassa se, että kappaleen muotoa rajoittaa muotti. Se täytyy olla poistettavissa. Tällöin muotin muodon täytyy mahdollisesti olla monimutkainen. Vastakkaisten kaarteiden valmistaminen on menetelmällä vaikeaa ja kuidun reittiä on vaikea muuttaa yhdessä lamellissa. Yksi yleinen ongelma on myös lopputuotteen huono pinnanlaatu. [55, s.538; 56 s.1-6 - 1-11]

5.2. Materiaalit

5.2.1. Hartsit

Suurta osaa tavallisista komposiitteihin soveltuvista kertamuovihartseista voidaan käyttää myös matriisimateriaalina kelauksessa. Käytetyimpiä hartseja ovat tyydyttymättömät polyesterit, vinyyliesterit ja epoksit, mutta myös muita kertamuovihartseja ja joitakin kestonuoveja voidaan käyttää. Yleensä valitaan erityisesti kelaukseen tarkoitettu hartsityyppi. Nämä hartsit ovat viskositeetiltaan, reaktiivisuudeltaan ja avoajaltaan tasapainotettuja sopimaan kelauksen vaatimuksiin. Viskositeetin tulee yleisesti olla suhteellisen matala, jotta kuitujen kostuminen olisi riittävää. Kuidut kulkevat usein kostutusaltaan läpi nopeasti, joten hartsin on tunkeuduttava kuitukimppuun nopeasti ja helposti. Tyypillisesti kelauksessa on käytetty hartseja, joiden viskositeetti on 350–2000 cP eli 0,35–2 Pa*s. Jos viskositeetti on alhaisempi kuin 350 cP, hartsi ei sovellu kelaukseen, koska hartsia saattaa valua muotilla ja osa kuiduista voi tällöin jäädä epätäydellisesti kostuneiksi.

Hartsin avoajan tulee olla pitkä, sillä kappaleen kelaamiseen voi kulua huomattavan pitkä aika. Lisäksi samasta hartsierästä voidaan kelata useita kappaleita. Materiaali ei saa kovettua ja sen viskositeetin on pysyttävä samana koko prosessin ajan. Yksi keino avoajan kasvattamiseen on käyttää lämmöstä aktivoituvaa initiaattoria. Näin ollen verkottumista ei tapahdu ennen kappaleen lämmittämistä. Tämän vuoksi kappaleet usein siirretään uuniin tai autoklaaviin kovettumaan. Kuitenkin, kun valmistetaan suuria kappaleita, uuni- tai autoklaavikövetus on vaikea toteuttaa. Jotkut valmistajat ovat ratkaisseet tämän käyttämällä lämpölamppuja. Kovettumisen tasaisuutta on kuitenkin vaikea hallita tällä keinolla.

Hartsin kovettumisen toivotaan tapahtuvan nopeasti. Tämä vähentää hartsin taipumusta valua tai painua kovetuksen alkuvaiheessa. Näin ollen hartsin tulee olla voimakkaasti reaktiivinen. Korkea reaktiivisuus saavutetaan, jos initiaattori tai itse hartsi reagoi nopeasti. Jos itse hartsi on voimakkaasti reagoiva, pitkä avoaika on vaikea saavuttaa. [57]

5.2.2. Lujitekuidut

Jatkuvakuitukomposiiteissa lujitekuitujen olisi tuotava suurin osa veto- ja puristuslujuudesta sekä jäykkyydestä. Lujitekuidulta vaaditaan kelaukseen yhtenäistä viimeistelykäsittelyä, nopeaa kostumista, hyvää levittäytymistä ja asettautumista muotille ja vähäistä taipumusta nukkaantumiseen. Kuten aikaisemmin on todettu, kuitulangalle halutaan alhainen kierteisyys komposiitin ominaisuuksien ja langan kostumisen parantamiseksi. Kelattava kuidun täytyy kuitenkin kestää kelauslaitteessa siihen kohdistuvat voimat. Lanka kestää yleensä suurempaa voimaa, kun sen kierteisyyttä kasvatetaan. Näin ollen kuidun kierteisyys pidetään mahdollisimman alhaisena prosessimenetelmän vaatimuksia kuitenkin unohtamatta. Suurinta osaa kuiduista voidaan kelata, yksittäisestä kuitunauhasta paksuihin touveihin. Lopputulos

riippuu suuresta määrästä suunnittelun, prosessoinnin ja kemian parametreja. Kelauksella voidaan saavuttaa hyvin suuria kuitutilavuuksia, jopa 70 tilavuusprosenttiin asti. [58; 29]

5.3. Sovellukset

Yleisimpiä kelauksella valmistettavia kappaleita ovat putkimaiset rakenteet, paineastiat, putket, rakettimoottorin vaipat, kemianteollisuuden säiliötankit ja raketinlaukaisuputket. Kehittyneet kelauslaitteet ja tietokoneavusteinen suunnittelu ovat mahdollistaneet monimutkaisempien geometrioiden tuottamisen ja monet alkuperäiset rajoitukset on näin voitettu. Muuan muassa kaarevia muotoja, yhdystankoja, pulloja, onkivapojaa, golf-mailojen varsia, kiristysrullia, holkkeja, vetoakseleita, työkalujen varsia, polkupyörien runkoja, pesäpallomailoja, jääkiekkomailoja, suksisauvoja voidaan nykyään valmistaa kelaamalla. [59, s. 141–142]

5.4. Luonnonkuidut kelauksessa

Ennen kuin kuituja voidaan käyttää kelauksessa, ne on kehrättävä langaksi. Ohuita kuituja kuten juuttia, hamppua ja pellavaa voidaan kehrätä ohueksi langaksi, mutta karkeammista kuiduista kuten sisalista saadaan paksumpi köysimäinen tuote. Ohuemmat langat ovat yleensä tasaisempia laadultaan ja niistä saadaan homogeenisempia tuotteita. Paksummat langat taas eivät tarvitse niin pitkää kelausaikaa ja ovat yleensä vähemmän alttiita kosteudelle. [60] Langan valmistus luonnonkuiduista on samanlainen prosessi (kuitujen avaus, sekoittaminen ja karstausta) kuin villan keritseminen. Karstauksen jälkeen kuituverkot kerätään esilangaksi kelaamisen avulla. Esilangasta voidaan tehdä lankaa ensin kahdentamalla se ja venyttämällä sitä orientaation ja tasaisuuden parantamiseksi. Tämän jälkeen esilangat voidaan kehrätä langaksi. [3, s. 177]

Sisallujitteista epoksia ja juuttilujitteista polyesteriä on valmistettu menestyksellä käyttäen kelausta valmistusmenetelmänä. [4, s.308] Alkalikäsittelyn vaikutusta kelaamalla valmistettavien juutti/kertamuovi-komposiittien ominaisuuksiin on tutkittu. Kun juuttilankaa käsiteltiin 25 % NaOH- liuoksella 20 minuuttia, langan vetolujuus parantui 120 % ja kimmomoduli 150 %. Juutti/epoksi-komposiitin ominaisuudet parantuivat 60 %, kun käytettiin näitä käsiteltyjä lankoja. Käsittelyn aikana tapahtuva kuitujen kutistuminen vaikuttaa kuidun rakenteeseen ja näin ollen valmistettavan komposiitin ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen. [4, s.309]

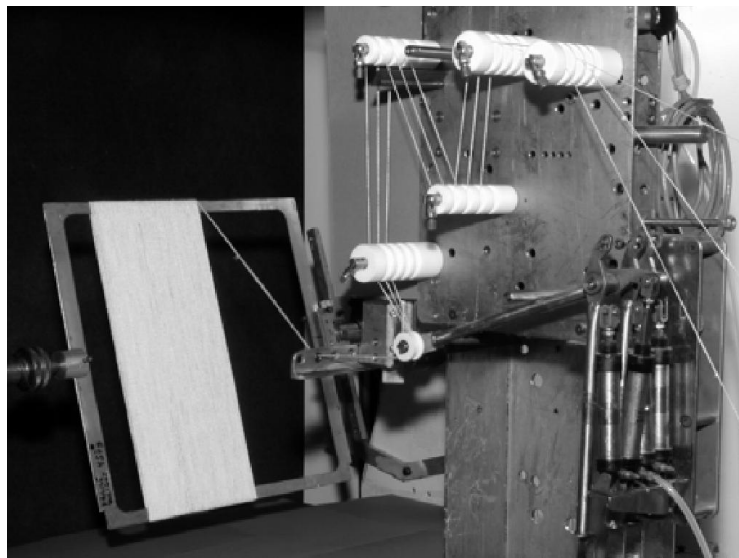
Sisalkuituja on myös kelattu. Sisal/epoksi sylinterimäisiä komposiitteja valmistettiin kelausten ja laminoinnin avulla. Käytettiin kierre- sekä vannekelausta. Huomattiin, että komposiittien valmistaminen oli helppoa ja melko edullista. Komposiittien vetolujuus oli 250–300 MPa, joka on noin puolet lasikuitu/epoksi-komposiitin lujuudesta, kun kuitua on käytetty saman verran. Kuitenkin, ominaislujuus

on verrattavissa lasikuidun vastaavaan sisal-kuidun alhaisen tiheyden takia. Sisal/epoksin UD moduliksi saatiin 8,5 GPa. [61]

Puuvilla/polyesteri sylintereitä on valmistettu kelaamalla. (Kuva 5.3) Tutkimuksessa valmistettiin 3, 5 ja 7 mm paksuisia sylintereitä. Tutkimuksen tarkoituksena oli esittää kelaamalla valmistettujen puuvilla/polyesterikomposiittien mahdollisuuksia ja etuja hylsyinä ja löytää tavanomaisille hylsymateriaaleille korvaavia luonnonkuitukomposiittimateriaaleja. [62] Kuvassa 5.4 on esitettyä koejärjestelyä, kun hamppu- ja kestonuovikuiduista kelataan tasomaisia kappaleita. [2]



Kuva 5.2. Puuvilla-polyesteri sylintereitä. [62]



Kuva 5.3. Koejärjestely, jossa hamppu- ja kestonuovikuiduista kelataan tasomaisia kappaleita. [2]

6. KOMPOSIITTIEIEN VALMISTAMINEN

6.1. Käytetyt materiaalit

6.1.1. Hartsit ja kovetin

Amroy Europe:n EpoBioX-hartsit on valmistettu luonnon fenoleista, jotka on tislattu metsäteollisuuden jätevirrasta. Raaka-aineena ei käytetä mitään ruoaksi soveltuvaa ainesosaa ja materiaalilla on hyvä saatavuus. Raaka-aineiden ja valmistetun hartsin hinta pystytään pitämään kilpailukykyisenä. Luonnon fenoleista valmistetaan bisfenoli A:ta. Epikloorihydriiniprosessissa on käytetty biopohjaista glyserolia. Bisfenoli A:ta, epikloorihydriiniä ja biopohjaisia lisäaineita sekä kovettajia on tämän jälkeen yhdistetty ja tuotteena saadaan EpoBioX-hartsia, jonka ainesosista 50–90 % on luonnosta peräisin. Hartsit soveltuu useimpiin komposiittisovelluksiin, mm. liimaksi, infuusioon ja pre-pregiksi. Viskositeettia voidaan säätää prosessin kannalta halutuksi. Hartsit sisältää jopa kolminkertaisen määrän OH-ryhmiä tavalliseen epoksiin verrattuna, joten sillä pitäisi olla erinomainen adheesio. Hartsin kimmomoduli on 2-3,2 GPa ja venymä 3-20 %. Hartsin tiheys on 1,1–1,2 g/cm³ 25 °C:ssa. Kelauksessa käytettiin EpoBioX LV:tä eli matalaviskoosista hartsia. [63; 64]

Vertailuhartsina käytettiin Amroy Europe:n Epopox AFLV:tä, joka on matalan viskositeetin epoksihartsit. Se soveltuu muun muassa RTM:ään, kelaukseen, laminointiin, pultruusioon ja infuusioon. Hartsin tiheys on 1,1–1,3 g/cm³ 25 °C:ssa. [64]

Kovettaja-aineena käytettiin karboksyylihapoanhydridipohjaista LS-81K kovettajaa, jonka avulla hartsille saatiin pitkä avo aika ja nopea kovettuminen korotetussa lämpötilassa. Kovettajan tiheys on 1,19 g/cm³. [65]

6.1.2. Kuitulangat

Pellavalanka hankittiin Safiliniä. Lanka on matalakierteistä (low twist) ja sitä tilattiin kahta erilaista tex-luvuiltaan, 400 ja 1000 texiä (g/km). Lanka on kehitetty kude- ja loimikutomiseen, UD prepregeihin, moniaksaaliseen kudontaan, kelaukseen, pultruusioon, neulontaan ja punoksiin. Valmistajan ilmoittamia teknisiä tietoja yksittäiselle kuidulle on taulukossa 6.1. Arvot on laskettu komposiittinäytteen ominaisuuksista seuraavalla tavalla: 330 g/m², UD kangas, 48 tilavuusprosenttia SAFILIN 100 % matalakierteistä pellavavinkia, prosessointimenetelmänä tyhjiömenetelmä ja hartsina epoksi. Valmistaja on tehnyt testit standardin ASTM D303 mukaisesti yhteistyössä Leuvenin katolisen yliopiston Metallurgy and Materials Engineering – laitoksen kanssa. [66]

Taulukko 6.1. Safilin pellavarovingin yksittäisen kuidun ominaisuuksia. [66]

Tiheys (g/m ³)	Kuidun halkaisija (μm)	Venymä (%)	Vetolujuus (MPa)	Kimmomoduli (GPa)	Ominaiskimmomoduli (GPa)
1.45	20	1.35	738	51.4	35.4

Cordenka GmbH:lta hankittiin viskoosilankaa CORDENKA[®] CR, jonka paksuus oli 250 tex ja filamenttien määrä 1350. Lanka oli kierteetöntä. CORDENKA[®] CR on edelleen kehityksen alla oleva tuote. Valmistajalla ei ollut esittää teknisiä tietoja 250 tex:n langasta, mutta 500 tex:n langalle on ilmoitettu muun muassa, että murtumisvoima on 239,9 N ja venymä murtumiskohdassa 13,4 %. Valmistaja suorittaa kaikki mekaaniset testit kierteiselle langalle (100 kierrettä/metri). [67]

Lasikuitu oli Ahlstrom Oyj:n R338-2400 E-lasikuiturovinki, jonka tex-luku on 2400.

6.2. Kelauskone

TTY:n muovi- ja elastomeeritekniikan laboratorion kelauslaitteistoon kuuluu kelauskone, kostutusallas ja kuitukaappi. Laitteisto on rakennettu käytettynä hankitun kelauskoneen pohjalta TTY:llä. Kelauskoneen tekniset tiedot on esitetty liitteessä 1.

6.3. Luonnonkuitulankojen kestävyysarviointia

Luonnonkuitulankojen kestävä voimaa ja näin soveltuvuutta kelaukseen arvioitiin suuntaa antavasti sitomalla langan päähän erikokoisia punnuksia ja nostamalla punnus ilmaan. Jos lanka kesti punnuksen massan, voitiin todeta, että lanka kestäi kyseisen voiman. Taulukkoon 6.2 on listattu eri luonnonkuitulankojen kestämiä voimia. Nähdään, että 400 tex:n pellavalanka kestäi vain 1,5 kg eli noin 150 N:n voiman. Lineaariselta tiheydeltään 1000 tex:ä oleva pellavalankaan voi kohdistaa suuremman voiman (maksimissaan n. 200–230 N), joten se valitaan kelaukseen pellavalangoista. Viskoosilangoilla ei synny merkittävää eroa siitä, onko lanka kierteinen vai ei. Kierteinen lanka kestäi suurta voimaa (4,8 kg) hieman pidempään kuin kierteetön, joten kierteisyyden voidaan todeta lisäävän langan suuntaista lujuutta. Kelausprosessin kannalta kierteetön lanka on kuitenkin optimaalisempi, sillä sen kostuttaminen hartsilla onnistuu paremmin.

Taulukko 6.2. Eri luonnonkuitulankojen kestämiä voimia. Erisuuruiset massat kuvaavat langan päähän sidottujen punnusten suuruutta.

	1.5 kg	2 kg	2.3 kg	3.4 kg	4.8 kg
Pellava 400 tex	x	ei kestä	ei kestä	-	-
Pellava 1000 tex	x	x	kestää hetken	-	-
Viskoosi 250 tex kierteetön	-	-	x	x	ei kestä
Viskoosi 250 tex kierteinen	-	-	x	x	ei kestä

6.4. Kappaleiden valmistus

Päätettiin valmistaa sisähalkaisijaltaan 73 mm paksuja poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoisia putkia, joiden pituus oli 60 cm. Putken kuituorientaatiot valittiin seuraavasti [$\pm 90^\circ/\pm 45^\circ/\pm 90^\circ$]. Taulukossa 6.3 on esitetty kelattavien putkien kuitu- ja hartsiyhdistelmät. Valmiin ohjelman avulla luotiin kelauskoneen liikeakseleille komennot, joiden avulla muotti ja liikkuva kelauspää saatiin liikkumaan siten, että muotille syntyi haluttu kuituarkkitehtuuri. Liitteessä 2 on taulukoituna kelauskoneen parametreja putkien valmistuksessa. Langan jännityksen asetusarvo akselin sylinteillä oli 3 bar. Kaikki käytetyt langat kestivät kelausprosessin. Vain jos lanka pääsi rispaantumaan, se saattoi katketa.

Taulukko 6.3. Kelaamalla valmistettavat näytteet.

Näyte	Kuitu	Tex-luku	Hartsi	Kovetin
P/BioX	Safilin pellava	1000	Amroy Oy, EpoBioX LV	LS-81 K
L/BioX	Ahlstrom lasikuitu	2400	Amroy Oy, EpoBioX LV	LS-81 K
P/Pox	Safilin pellava	1000	Amroy Oy, Epopox AFLV	LS-81 K
L/Pox	Ahlstrom lasikuitu	2400	Amroy Oy, Epopox AFLV	LS-81 K
V/BioX	Cordenka CR viskoosi	250	Amroy Oy, EpoBioX LV	LS-81 K

6.4.1. Lasikuitu- ja pellavakomposiitit

Muottina toimi 73 mm halkaisijaltaan oleva teräsputki, jossa oli hieman päästöä, jotta kelattu kappale voitiin poistaa muotin ympäriltä. Valmistusprosessi aloitettiin teräsmuotin hiomisella hiekkapaperilla. Tämän jälkeen muotin pinnalle levitettiin useita kerroksia Loctite Frekote 700-NC irrotusainetta. Kostutusallas päällystettiin kalvolla. Muotin molempiin päihin kappaleen loppukohtiin asetettiin irrotuskalvot helpottamaan irrotusta muotista.

EpoBioX-hartsin ja kovettimen sekoitussuhde oli 100:75. Epopox AFLV-hartsin ja kovettimen sekoitussuhde oli 100:100. Sekoittamisen jälkeen hartsi laitettiin kostutusaltaseen ja lämmitettiin sitä noin 40 °C asteeseen. Tämän jälkeen aloitettiin langan kelaus. Lanka kulki kostutusaltaan läpi muotille. Aluksi kelattiin $\pm 90^\circ$ kulmassa olevat kerrokset muotin pyörimisakselin suhteen. Kerrokset olivat siis vannekelattu suurimmalla mahdollisella kulmalla. Tämän jälkeen tehtiin kierrekelaus $\pm 45^\circ$ kulmassa,

jolla saatiin putkeen pituusjäykkyyttä ja kiertojäykkyyttä. Lopuksi kelattiin vielä samanlainen vannekelaus kuin aluksi eli kaksi kerrosta $\pm 90^\circ$ kulmassa. Tarkat arvot kuituorientaatiolle saatiin laskemalla alkuarvoista siten, että syntyi täysiä kierroksia ja että kuitukerrokset peittivät muotin koko alan tasaisesti. Kuvassa 6.1 on esitetty pellavan kelausta 90° kulmassa.

Kun kaikki kerrokset olivat valmiita, kierrettiin kelatun kappaleen ympärille läpinäkyvä kalvo ja lämmitettiin sitä sen verran, että kalvo kiristyi ja ylimääräinen hartsi valui ulos. Kelattu kappale jätettiin paikoilleen kovettumaan. Tämän jälkeen kappale siirrettiin muotissa uuniin. Pellava/EpoBioX komposiittia pidettiin 8 tuntia 80°C :ssa. Kovettumisen jälkeen kappale poistettiin muotista. Kappaletta pidettiin vielä 1 tunti 130°C :ssa kovetuksen varmistamiseksi. Muita kappaleita kovetettiin uunissa 130°C :n lämpötilassa 75 minuuttia.

Putken poistaminen teräsmuotin ympäriltä tapahtui vasaroimalla sitä holkin avulla muotin kapeampaa päätä kohden. Pellavaputket irtosivat muotista kaikkein helpoiten. Lasikuituputkien irrottamiseen tarvittiin paljon työtä. Lopullisen pellava tuotteen ulkopinnan laatu ei ole yhtä hyvä kuin lasikuituputkella.



Kuva 6.1. Pellavan kelausta kelauskulmalla $89,25^\circ$.

6.4.2. Viskoosikomposiitti

Viskoosiputkien kuituarkkitehtuuri poikkesi $[\pm 90^\circ/\pm 45^\circ/\pm 90^\circ]$ rakenteesta, sillä kuitulanka oli huomattavasti ohuempaa verrattuna pellavaan tai lasikuituun. Viskoosiputkelle kelattiin rakenne $[\pm 90^\circ/\pm 90^\circ/\pm 45^\circ/\pm 90^\circ/\pm 90^\circ]$. Prosessia varten lankaa kelattiin toiselle puolalle, sillä kelaus suoritettiin kahdella langalla, jotta valmistettavan komposiitin paksuutta voitiin hieman lisätä ja kelausaikaa lyhentää. Langat kulkivat rullilta kostutusaltaan läpi erillisinä ja yhdistyivät kelauspäällä.

Ensimmäisen kelatun viskoosiputken irrotuksessa oli ongelmia. Tämän putken kuituarkkitehtuuri oli vielä sama, jota käytettiin pellava- ja lasikuituputkille. Irrottamisessa yritettiin käyttää apuna nestettyä kutistamaan teräsmuottia, mutta siltikään viskoosiputki ei irronnut. Lisäksi havaittiin, että hartsi ei kestänyt nestetyypikäsittelyä vaan haurastui, joten ensimmäinen kokeilu viskoosin kelaussessa ei onnistunut. Lopulta viskoosiputki irrotettiin halkaisemalla rakenne.

Seuraavaa kelausta varten irrotusaine vaihdettiin, jotta irrotus mahdollisesti helpottuisi. Käytettiin Zyvox Watershield huokoslakkaa ja liuotinpohjaista irrotusainetta. Tällä kertaa putken irrottaminen muotista onnistui, mutta putki ei ollut tarpeeksi jäykkä kestäämään koekappaleiden työstämistä. Jo ruuvipenkkiin kiinnitys osoittautui vaikeaksi, sillä putki ei kestänyt kiristyksen aiheuttamaa puristusvoimaa. Putken seinämänpaksuus oli vain n. 1,7 mm. Jotta saataisiin lasikuitukomposiittien paksuinen putki, täytyisi kelata 3-4-kertainen määrä kerroksia lasikuituputken kuituarkkitehtuuriin nähden. Viskoosiputken kuitu näytti hyvin kuivalta sahauskohdissa ja putken päissä. Epäiltiin, että kelaussessa kuidun impregnoituminen hartsilla ei ole kovin tehokasta ja adheesio ei ole paras mahdollinen. Näitä päätettiin tutkia putkesta pyyhkäisyelektronimikroskopian avulla. Kuvassa 6.2 on kelatut pellava- ja viskoosiputket. Viskoosiputken pinta on hieman sileämpi kuin pellavaputken.



Kuva 6.2. Luonnonkuiduista kelatut putket. Vasemmalla pellava ja oikealla viskoosi.

6.5. Kuidun ja matriisin tilavuusosuudet

Kuitujen massaosuus W_f kelatuissa kappaleissa arvioitiin suuntaa antavasti punnitsemalla kuiturulla ennen ja jälkeen kelausten ja arvioimalla kelaukseen käytetyn hartsin määrä punnitsemalla kostutusaltaaseen jäljelle jäänyt hartsi. Tämä pystyttiin kuitenkin toteuttamaan vain Lasikuitu/EpoBioX ja Viskoosi/EpoBioX – putkille, sillä pellavaputkea valmistettaessa lanka katkesi muutaman kerran solmujen takia ja kuitua jouduttiin purkamaan muotilta. Näin ollen punnitustulokset eivät pitäneet enää paikkaansa. Muille näytteille massaosuudet päätettiin määrittää suuntaa antavasti punnitsemalla näytekappale ja määrittämällä sen dimensiot mahdollisimman tarkasti. Näin saatiin selvitettyä komposiitin likimääräinen tiheys ρ_{comp} , ja kun tiedettiin myös kuidun ja matriisin tiheydet (ρ_f ja ρ_m), voitiin tätä kautta määrittää kuitujen massaosuus seuraavasti:

$$\frac{1}{\rho_{comp}} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{1-W_f}{\rho_m} \quad (1)$$

$$W_f = \frac{(\rho_m \rho_f) / \rho_{comp} - \rho_f}{\rho_m - \rho_f} \quad (2)$$

Kuitujen tilavuusosuus komposiitissa V_f voidaan määrittää massaosuuksista W_f ja W_m seuraavalla kaavalla [40, s.102]:

$$V_f = \frac{W_f / \rho_f}{W_f / \rho_f + W_m / \rho_m} \quad (3)$$

Kolmantena tilavuusosuuden määrittystapana käytettiin tiheyden määrittämistä Wallace X21B tiheysmittarilla. Tiheys määritettiin punnitsemalla näyte ilmassa ja vedessä. Tiheydestä laskettiin massa- ja tilavuusosuudet edellä mainituilla kaavoilla.

Taulukkoon 6.3 on koottu eri menetelmin lasketut kuitujen massa- ja tilavuusosuudet komposiittiputkissa. Tiheyden arvoina kuiduille ja matriiseille käytettiin valmistajien ilmoittamia tiheyden arvoja tai jos niitä ei ollut saatavilla, kirjallisuudessa esitettyjä (taulukko 2.1). Tiheyksinä käytettiin seuraavia tiheysarvoja:

$\rho(\text{Epopox AFLV/LS81K}) =$	1,145–1,245 g/cm ³
$\rho(\text{EpoBioX/LS81K}) =$	1,14–1,20 g/cm ³
$\rho(\text{Lasikuitu}) =$	2,5 g/cm ³
$\rho(\text{Pellavakuitu}) =$	1,45 g/cm ³
$\rho(\text{Viskoosi}) =$	1,52 g/cm ³

Taulukko 6.3. Eri menetelmin määritettyjä kuitujen massa- ja tilavuusosuuksia. Harmaalla ovat arvot, jotka ovat todennäköisesti liian pieniä. Tämä saattaa johtua komposiittien huokoisuudesta, minkä vuoksi laskentatapa osoittautuu huonoksi.

	Lähtö- aineiden punnitus W_f	Lähtö- aineiden punnitus V_f	Dimen- sioiden mittaus W_f	Dimen- sioiden mittaus V_f	Tiheys- mittari W_f	Tiheys- mittari V_f
L/EpoBioX	67%	49%	66%	48%	71-73%	54-55%
L/Epopox	-	-	70%	53%	-	-
P/EpoBioX	-	-	-	-	20%	16-17%
P/Epopox	-	-	18%	15-16%	35%	30-32%
V/EpoBioX	56-62 %	54-62 %	-	-	-	-

Kaikki määrittämenetelmät ovat vain suuntaa antavia. Lasikuitu/EpoBioX komposiitille laskettiin kuitenkin jokaisella menetelmällä samansuuntainen arvo, joten voidaan melko suurella todennäköisyydellä sanoa, että lasikuitukomposiittien tilavuusosuus on 65–75 % ja massaosuus 45–55 %. Pellavakomposiittien tulokset eivät sitä vastoin ole luotettavia. Tämä voi johtua siitä, että pellavakomposiittien tapauksessa hartsin ja kuitujen tiheydellä ei ole suurta eroa, joten tiheyteen perustavat laskennat eivät pidä yhtä hyvin paikkaansa kuin lasikuitukomposiiteilla, joilla hartsin ja kuitujen tiheysero on huomattava. Myös pellavakomposiittien huokoisuudella on vaikutusta laskukaavoihin. Jos huokoisuutta ei tilavuuden ja tiheyden määrittämisessä oteta huomioon, jäävät teoreettiset massa- ja tilavuusosuudet pienemmiksi kuin kokeelliset. Jos kuitupitoisuus on hyvin pieni, vaikutukset näkyvät myös alhaisina mekaanisina ominaisuuksina.

7. TESTAUSMENETELMÄT

7.1. DSC

EpoBioX-hartsin kovettuminen tarkastettiin DSC:llä (Differential Scanning Calorimetry) eli differentiaalisella pyyhkäisykalorimetrialla. Kahdeksan tuntia 80 °C:ssa kovettunutta pellava/EpoBioX-komposiittinäytettä tutkittiin Netzsch DSC 204 F1-laitteistolla. 11.450 mg näyte suljettiin alumiiniseen näyteastiaan ja lämmitettiin lämpötilasta 20 °C nopeudella 10 °C/min lämpötilaan 300 °C. Tutkittiin, syntyykö käyrään eksotermista piikkiä, joka osoittaisi, että epoksin kovettumista tapahtuu vielä ajon aikana. Testi suoritettiin yhdellä näytteellä.

Kovetuslämpötilaa nostettiin ja DSC:n avulla määritettiin sopiva kovetusaika 130 °C asteessa. Kovetuksen aikana kappaleesta otettiin näytteitä DSC:tä varten aluksi 15 minuutin välein ja tunnin jälkeen 30 minuutin välein 2 tuntiin asti ja tämän jälkeen vielä yksi näyte 3 tunnin päästä kovetuksen aloittamisesta. Testausjärjestelyt olivat samat kuin ensimmäisessä DSC-mittauksessa. DSC-käyristä pääteltiin, millä hetkellä hartsi on kovettunut täydellisesti ja kuinka korkea on hartsin lasisiirtymälämpötila T_g .

7.2. Renkaan vetokoe

Putken radiaalinen vetolujuus määritetään standardin ASTM D2290 mukaan. Testikappaleen mitat poikkeavat kuitenkin siitä, mitä standardissa määritellään. Standardi kuvaa suhteellisen näennäisen vetolujuuden määrittämistä split disk-menetelmän avulla. Menetelmää voidaan käyttää lujitetuista kertamuoveista valmistettujen putkimaisten kappaleiden tutkimiseen valmistusmenetelmästä riippumatta.

Testikappaleena toimi putkesta leikattu rengas, jonka leveys oli noin 14 mm. Renkaaseen tehtiin kavennukset siten, että kavennetun kohdan leveys oli 10 mm. Luotettavien tulosten saamiseksi täytyi testata vähintään 5 testirengasta. Renkaat työstettiin putkesta rautasahalla sahaamalla ja jyrsimällä niihin kavennukset. Kuvassa 7.1 on esitetty valmiita koekappaleita.

Testikappaletta kuormitettiin kuvan 7.1 mukaisilla vetojigeillä, jotka aiheuttavat vetojännityksen testiputkeen. Testin avulla saadaan näennäinen vetolujuus, sillä testin aikana tapahtuu taipumista jigien jakokohdassa. Jigit on kuitenkin suunniteltu siten, että taipuminen minimoituu.



Kuva 7.1. Split disk-vetokokeeseen käytettävät testijigit sekä putkesta työstetyt pellava- ja lasikuitukoekappaleet.

Testikappaleen näennäinen vetolujuus σ_a saadaan kaavan (4) avulla seuraavasti:

$$\sigma_a = P_b / 2A_m \quad (4)$$

jossa P_b on maksimivoima ja A_m kavennettujen kohtien pinta-ala (paksuus*leveys). Tuloksista lasketaan keskiarvo ja keskihajonta. [68]

Vetokoe suoritettiin Instron 8801 hydraulisella aineenkoetuskoneella (kuva 7.2). Vetokokeessa käytettiin 100 kN:n voimaselliä ja vetonopeus oli 5 mm/min. Jokaisen koekappaleen kavennuskohtien paksuudet ja leveydet mitattiin työntömitalla ennen testausta.



Kuva 7.2. Instron 8801 aineenkoetuskone.

7.3. Iskukoe

Iskulujuutta tutkittiin standardia SFS-EN ISO 179-1 mukaillen. Testikappaleiden geometria kuitenkin poikkesi standardissa esitettyyn putken kaarevan muodon takia. Näin ollen tulokset ovat vain keskenään vertailukelpoisia, niitä ei voida verrata kirjallisuusarvoihin. Koekappaleiden dimensiot olivat noin 80x10x4 millimetriä. Iskukokeessa verrattiin pellavakuitukomposiittien Charpy-iskulujuusarvoja lasikuidun vastaaviin arvoihin. Testissä käytettiin CEAST Resil 5.5 J iskukoelaitteistoa (kuva 7.3) ja instrumentoitua 5 J:n iskuvasaraa. Iskukoesauvat työstettiin putkista tekemällä suikalemaisia iskusauvoja. Iskut kohdistettiin kappaleiden leveämpää pintaa ja kuperaa puolta vasten. Pellavaputkista työstettiin koekappaleita rautasahalla, sillä putken sisäpinnan kuidut repeytyivät järeämmillä työkaluilla. Työstäminen on ilmeisesti vaikeaa, koska pellavalanka ei ole läpikostunut. Lasikuitukomposiittikoekappaleet työstettiin vesileikkauksen avulla. Standardin mukaan jokaisesta materiaalista tulisi testata vähintään 10 koekappaletta, mutta koska pellavakoekappaleiden työstäminen käsin oli erittäin hidasta ja materiaalia rajallisesti käytössä, päätettiin testata vain 3 koekappaletta jokaista materiaalia. Ennen testin suorittamista koekappaleita tuli vakioida lämpötilassa 23 °C ja 50 %:n suhteellisessa ilmankosteudessa vähintään 16 tuntia. Charpy-iskulujuus a_{cU} (kJ/m²) lasketaan kaavan (5) mukaan, jossa E_c on iskuenergia (J), h näytteen paksuus (mm) ja b_N näytteen leveys (mm).

$$a_{cU} = E_c / hb_N * 10^3 \quad (5)$$



Kuva 7.3. CEAST Resil 5.5J iskukoelaitteisto.

7.4. Aksiaalinen vetokoe

Vetokoetta varten putkesta työstettiin vetokoesauvoja putken akselin suunnassa (kuten kuvassa 7.3). Lasikuitukappaleille käytettiin vesileikkausta ja pellavakappaleet työstettiin rautasahalla. Kuitujen orientaatio ei ole paras mahdollinen aksiaalista vetokoetta ajatellen, sillä kuidut eivät ole asettuneet vedon suunnassa. Tästä johtuen aksiaalisen vetokokeen tulokset kertovat lähinnä hartsin toiminnasta eli kuitujen kostumisesta ja hartsin adheesiosta kuituihin. Tietenkin $\pm 45^\circ$ kerrokset tuovat

kappaleisiin hieman lujuutta myös poikittaissuunnassa, mutta jos adheesio on heikkoa, merkitys on vähäinen.

Vetokokeet suoritettiin standardia SFS-EN ISO 527-1 mukaillen. Vetokoesauvat tosin poikkesivat standardissa esitetyistä. Ne olivat pituudeltaan noin 100 mm, leveydeltään 10 mm ja paksuudeltaan kelatun putken seinämän paksuisia. Käytettiin vetonopeutta 5 mm/min. Ekstensiometrin veitsien väli oli 25 mm poiketen normaalista (50 mm). Kuten iskukoesauvojen tapauksessa, myös vetokoesauvoja oli vaikea työstää ja päätettiin testata vain 3 koesauvaa materiaalia kohden. Kimmomoduli määritettiin 0,05-0,25 %:n venymän alueelta.

7.5. Mikroskooppinen tarkastelu

Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla eli SEM:llä tarkasteltiin pellava- ja viskoosikomposiittien hiepintoja. Tutkittiin kuitujen asettumista, huokoisuutta ja adheesiota. Näytteet valettiin hartsinappiin ja hiottiin. Tämän jälkeen niille tehtiin hiiletys, jotta pinta muuttuisi sähköä johtavaksi. Siltikin tarkastelussa tapahtui jonkin verran varautumista. Mikroskooppina käytettiin Philips XL-30 pyyhkäisyelektronimikroskooppia. Putkesta leikattu rengas halkaistiin ja poikkipinta toimi tarkastelupintana.

Optisella mikroskoopilla tarkasteltiin hartsilla kostutettuja sekä kuivia lankoja. Tarkasteltiin, kuinka kuitu on kostunut hartsilla ja onko langassa näkyvillä kuivia kohtia. Lisäksi tarkasteltiin pellava/Epopox AFLV komposiitin hiottua poikkileikkausta. Tarkasteluun käytettiin Leica MZ 7.5 zoomstereomikroskooppia. Tarkastelupintana kaikissa näytteissä toimi halkaistun renkaan poikkipinta.

7.6. Veden absorptio

Veden absorptiota komposiitteihin testattiin mukaillen standardia SFS-EN ISO 62. Näytekappaleista tutkittiin veden imeytymisestä johtuvaa muutosta massassa. Kokeessa testikappaleet upotettiin huoneenlämpöiseen tislattuun veteen ja veden absorptio määritettiin punnitsemalla kappaleet ennen veteen upotusta ja sen jälkeen tietyin väliajoin. Jokaista materiaalia kohden testattiin vähintään 3 koekappaletta. Putkimaiselle kappaleelle, jonka sisähalkaisija oli pienempi kuin 76 mm, testikappaleeksi sahattiin pituudeltaan 25 ± 1 mm:n kokoisia kappaleita kohtisuoraan putken pituussuuntaan nähden. Sahausreunat täytyi suojata, jotta estettiin veden imeytyminen reunoista. Suojaus tehtiin kostuttamalla sahatut pinnat matriisina käytetyllä hartsilla ja kovettamalla hartsi uunissa 130 °C:ssa 1 tunti 15 minuuttia. Koekappaleita kuivattiin ennen koetta uunissa 50 °C:ssa 24 tunnin ajan. Tämän jälkeen niiden annettiin jäähtyä eksikaattorissa huoneenlämpöön, minkä jälkeen ne punnittiin 1 mg tarkkuudella. Punnitus toistettiin niin monta kertaa, että massa oli vakio. Tämän jälkeen testikappaleet upotettiin huoneenlämpöiseen tislattuun veteen. Tietyin aikaväleihin koekappaleet otettiin vedestä, kuivattiin pinnat ja punnittiin minuutin sisällä vedestä ottamisesta 1 mg

tarkkuudella. Aikaväli oli 1, 2, 5, 7, 9, 14, 21, 28, 35 vuorokautta. Jokaiselle testikappaleelle lasketaan prosentuaalinen massan muutos c suhteessa alkuperäiseen massaansa seuraavan kaavan avulla:

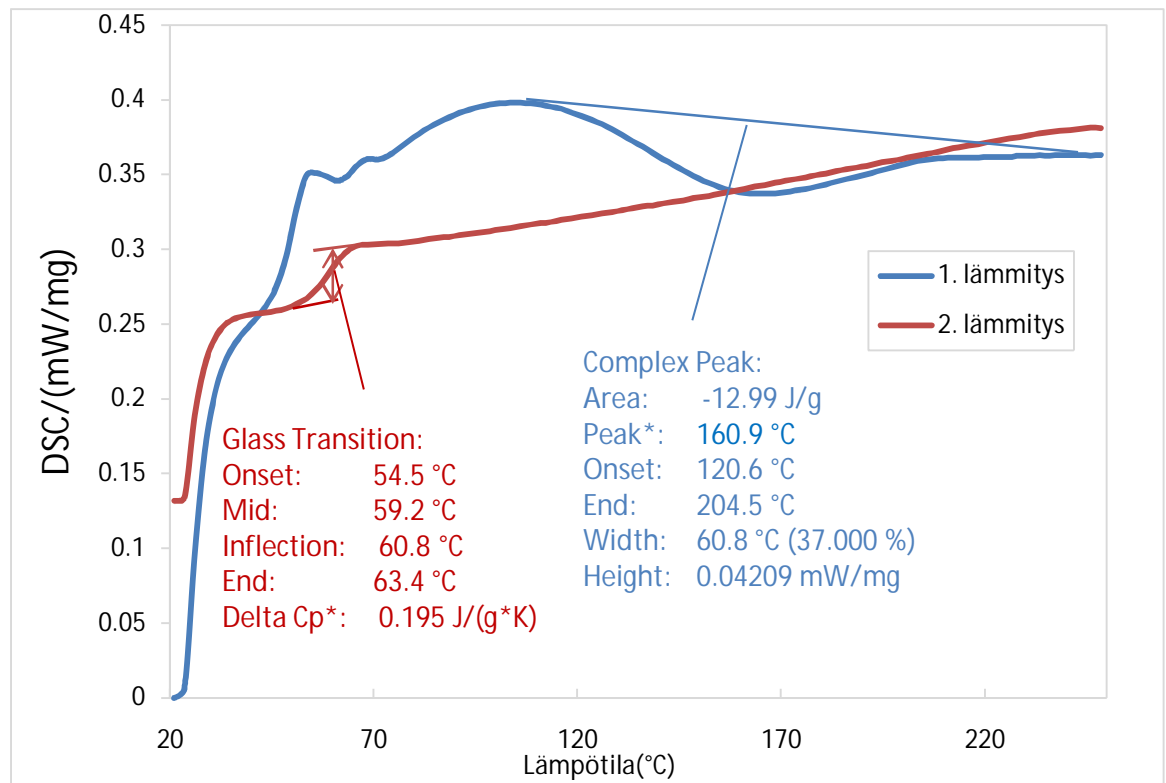
$$c = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (6)$$

jossa m_1 on testikappaleen massa kuivauksen jälkeen ennen veteen upotusta ja m_2 massa veteen upotuksen jälkeen. Määritettiin kolmen koekappaleen veden absorption keskiarvo ja keskihajonta jokaisessa aikapisteessä.

8. TULOSTEN TARKASTELU

8.1. DSC tulokset

Kuvassa 8.1 on esitetty DSC-käyrä hartsista 8 tunnin lämmittämisen jälkeen 80 °C:ssa.

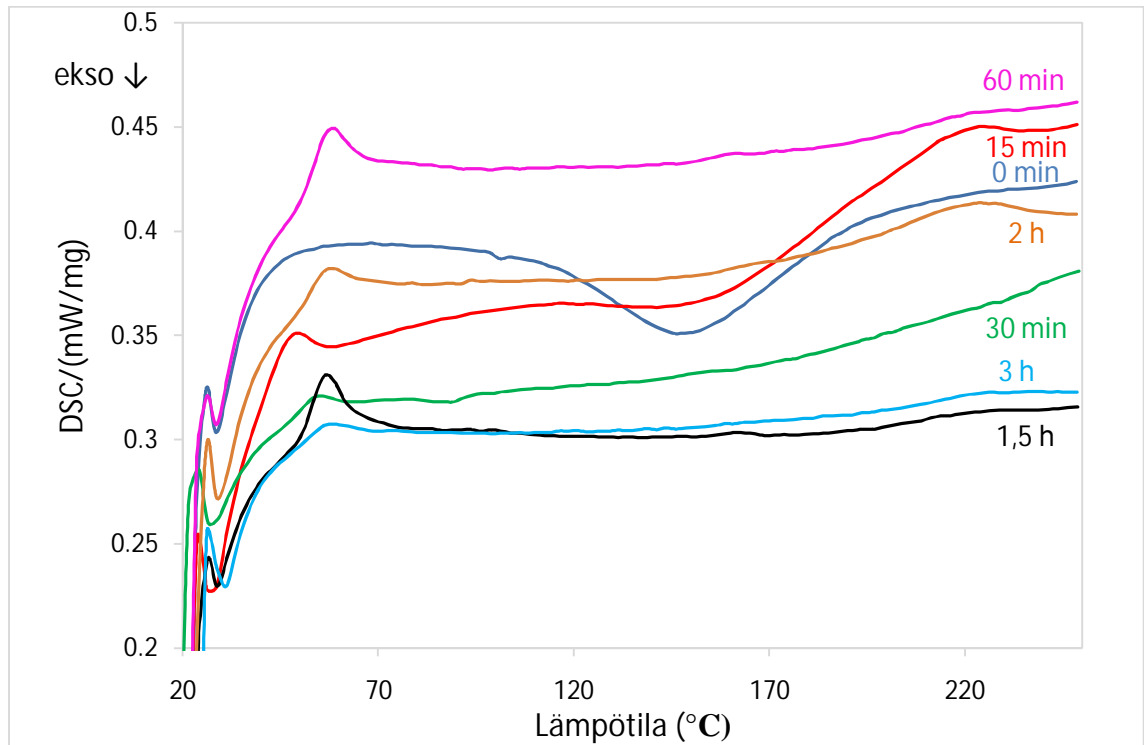


Kuva 8.1. P/EpoBioX-komposiitin DSC-käyrä 8 tuntia 80 °C asteessa ensimmäisen (sininen) ja toisen lämmityksen (punainen) aikana.

Ensimmäisellä lämmityksellä on käyrässä nähtävissä leveä eksotermisen piikki 120–200 °C:een kohdalla, joten epoksi kovettuu vielä ajon aikana. Lasisiirtymälämpötilaa T_g on vaikea erottaa. Toisen lämmityksen aikana ei enää havaita eksotermistä piikkiä, joten kovettuminen on täydellistä. Hartsin lasisiirtymälämpötila T_g on toisen lämmityksen aikana 59,2 °C.

DSC:n perusteella päätettiin nostaa kovettumislämpötilaa 130 °C asteeseen. Kuvassa 8.2 on esitetty lasikuitu/EpoBioX-komposiitin DSC-käyriä kovettumisen aikana 130 °C asteessa. Nähdään, että ensimmäisen tunnin aikana tapahtuvat suurimmat muutokset ja 60 minuutin jälkeen käyrän muoto ei enää juurikaan muutu. Eksotermisen piikki on nähtävissä selvästi vain 0 minuuttia kovettuneesta näytteestä. Myös 15

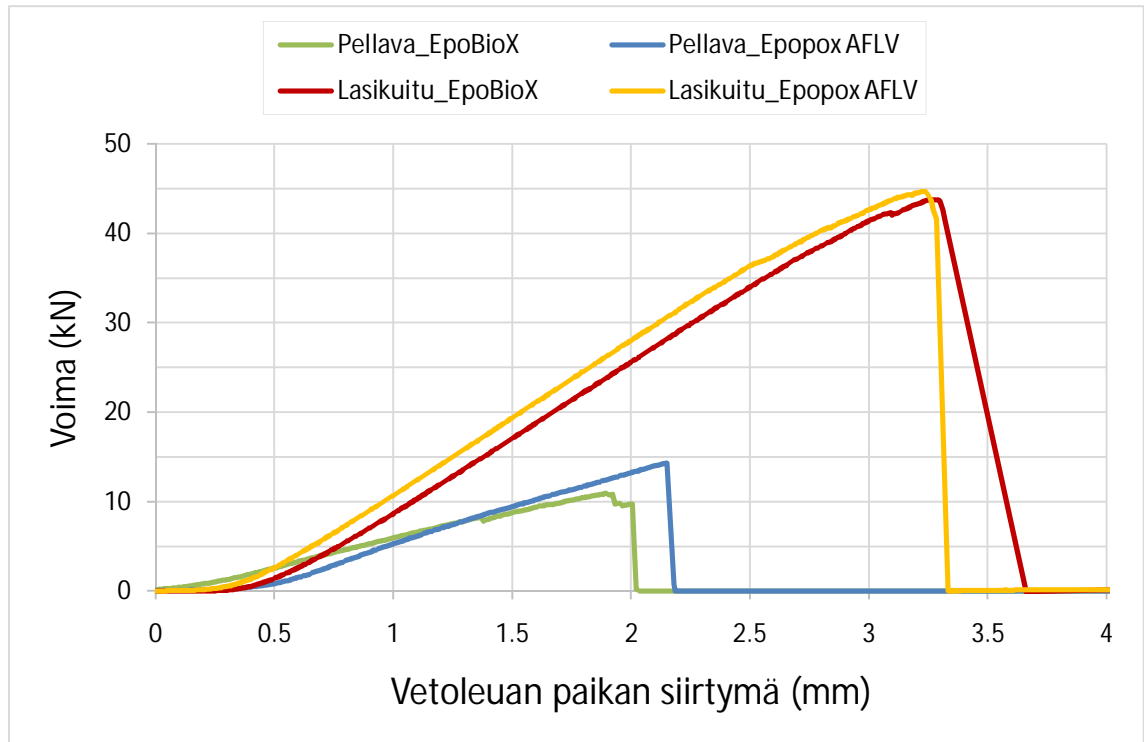
minuuttia kovettuneesta näytteestä voidaan huomata mahdollista kovettumista, vaikka piikki ei olekaan kovin selkeä.



Kuva 8.2. L/BioX-komposiitin DSC-käyriä kovetuksen eri vaiheissa 130 °C asteessa.

8.2. Rengasvetokoe

Rengasvetokokeet suoritettiin kahdelle pellava- ja kahdelle lasikuitukomposiittikoesarjalle. Kaikista materiaaleista testattiin viisi rinnakkaista näytekappaletta. Vetokoe antoi tuloksena voiman P (kN) vetoleuan paikan siirtymän (mm) funktiona. Kuvassa 8.3 on esitettyä jokaiselle materiaalille tyypillinen voimakäyrä. Voidaan havaita, että lasikuitukomposiittien maksimivoimat ovat vajaa 45 kN:n luokkaa ja pellavakomposiittien 10–15 kN:n luokkaa. Vastaavasti vetoleuan paikka muuttuu lasikuitukomposiiteille noin 3–3,5 mm ja pellavakomposiiteille noin 2 mm vedon aikana. Pellavakomposiiteilla on siten alhainen venymä.



Kuva 8.3. Voima P (kN) vetoleuan siirtymän suhteen kuvaajalla eri näyttemateriaaleille.

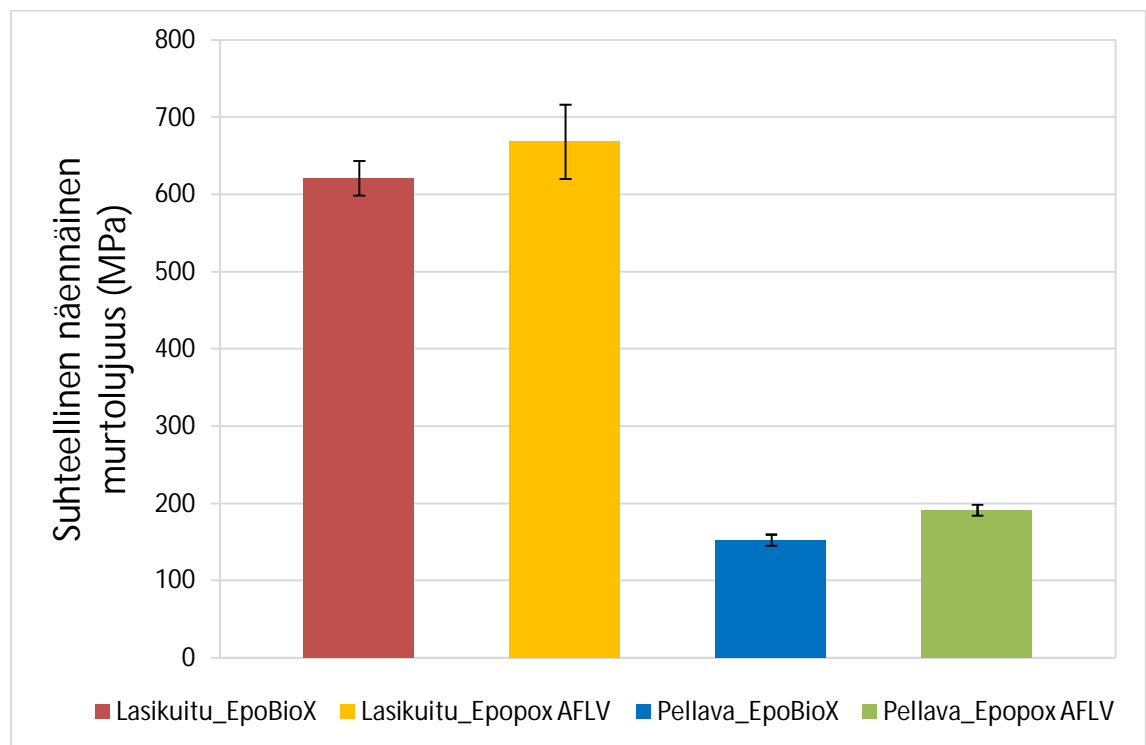
Vetokokeiden maksimivoiman P_b (kN) arvoista laskettiin komposiittiputkien näennäiset suhteelliset murtolujuudet σ_a (MPa) putken radiaalisessa suunnassa kaavan (4) avulla. Maksimivoima P_b siis jaettiin kavennuskohtien pinta-alalla. Jokaisen koesarjan viidestä koekappaleesta laskettiin keskiarvot ja keskihajonnat. Laskennat on esitetty taulukossa 8.1.

Taulukko 8.1. Rengasvetokokeiden suhteelliset murtolujuudet σ_a (MPa) keskiarvoineen ja keskihajontoineen.

	Lasikuitu EpoBioX σ_a (MPa)	Lasikuitu Epopox AFLV σ_a (MPa)	Pellava EpoBioX σ_a (MPa)	Pellava Epopox AFLV σ_a (MPa)
1	610.163	701.729	140.469	180.682
2	624.973	607.431	155.679	195.655
3	620.613	627.046	153.367	195.121
4	595.463	715.321	158.606	197.963
5	655.818	691.216	156.422	188.704
k.a.	621.406	668.549	152.909	191.625
keskihajonta	22.344	48.115	7.201	7.016

Komposiittien näennäisten suhteellisten murtolujuuksien keskiarvoista ja keskihajonnoista piirrettiin pylväsdiagrammi (kuva 8.4). Keskihajonnat on esitetty virhepalkkeina pylväissä. Lasikuitu/EpoBioX -kappaleiden murtolujuus on noin 621 MPa, kun lasikuitu/Epopox AFLV -kappaleiden on noin 669 MPa. Vastaavasti

pellava/EpoBioX –kappaleiden murtolujuus on noin 153 MPa, kun pellava/Epopox AFLV –kappaleiden on noin 192 MPa. Tavanomaisella epoksihartsilla kostutetut komposiitit ovat siten hieman lujempia kuin EpoBioX-hartsilla kostutetut. Tosin pellava/EpoBioX – komposiitteihin saattoi aiheutua jonkin verran alkujännitystä, kun vetojigien asettamiseen rengaskoekappaleiden sisään jouduttiin käyttämään hieman enemmän voimaa kuin muilla koekappaleilla. Tämä johtui ilmeisesti siitä, että pellava/EpoBioX – putkea käytettiin ensimmäisen kovetuksen jälkeen vielä uunissa ilman teräsmuottia, jolloin putken sisähalkaisijassa on tapahtunut pientä muutosta. Lasikuitukomposiitit ovat noin neljä kertaa lujempia kuin pellavakomposiitit. Yksi syy suureen eroon on varmasti se, että pellavakuidut eivät ole kostuneet hartsilla yhtä hyvin kuin lasikuitu. Heijenrath ja muut [69] valmistivat UD pellava/epoksikomposiitteja muunnellulla pultruusioprosessilla. Pitkittäissuunnan vetolujuus komposiiteilla oli 325 MPa, kun lasikuitu/epoksikomposiiteilla lujuus oli 900 MPa. Suhteellisia murtolujuusarvoja ei voida suoraan verrata tutkimuksen arvoihin, mutta voidaan todeta, pellavakomposiitin lujuus oli kirjallisuudessa 36 % lasikuitukomposiitin lujuudesta. Tässä työssä pellavakomposiittien lujuuden suhde lasikuitukomposiittien lujuuteen oli noin 25–29 %, joten rengasvetokokeen tulokset ovat siten samansuuntaisia kuin kirjallisuudessa esitetyt arvot, vaikka kostuminen ei olekaan ollut optimaalista.



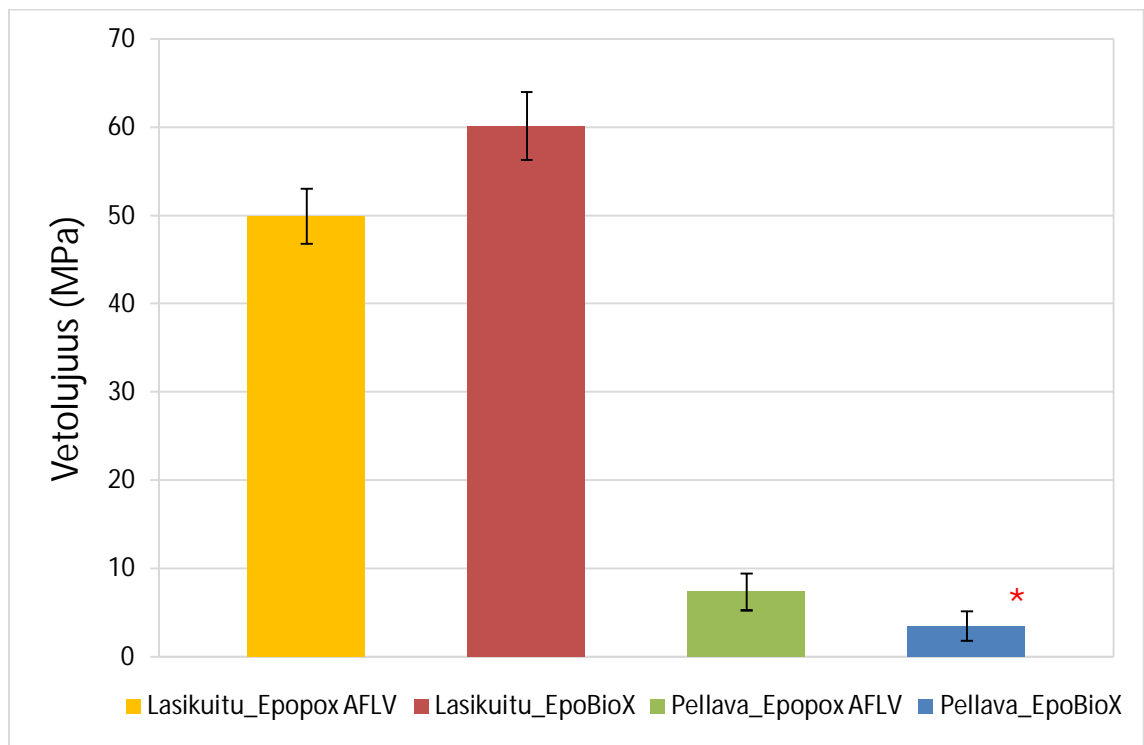
Kuva 8.4. Putkien näennäisten suhteellisten murtolujuuksien keskiarvot keskihajontoineen (MPa).

8.3. Aksiaalinen vetokoe

Putken aksiaalinen vetolujuus määritettiin luvussa 7.4 esitetyllä tavalla. Koska putken aksiaalisessa suunnassa ei ole juurikaan kuituja (vain ± 45 kerros lujittaa osittain), kertoo

vetokoe kuidun ja matriisin välisestä adheesiosta. Saatua arvoja voidaan verrata lujittamattoman hartsin arvoihin ja tehdä näin johtopäätöksiä kostumisen ja adheesioinnistumisesta.

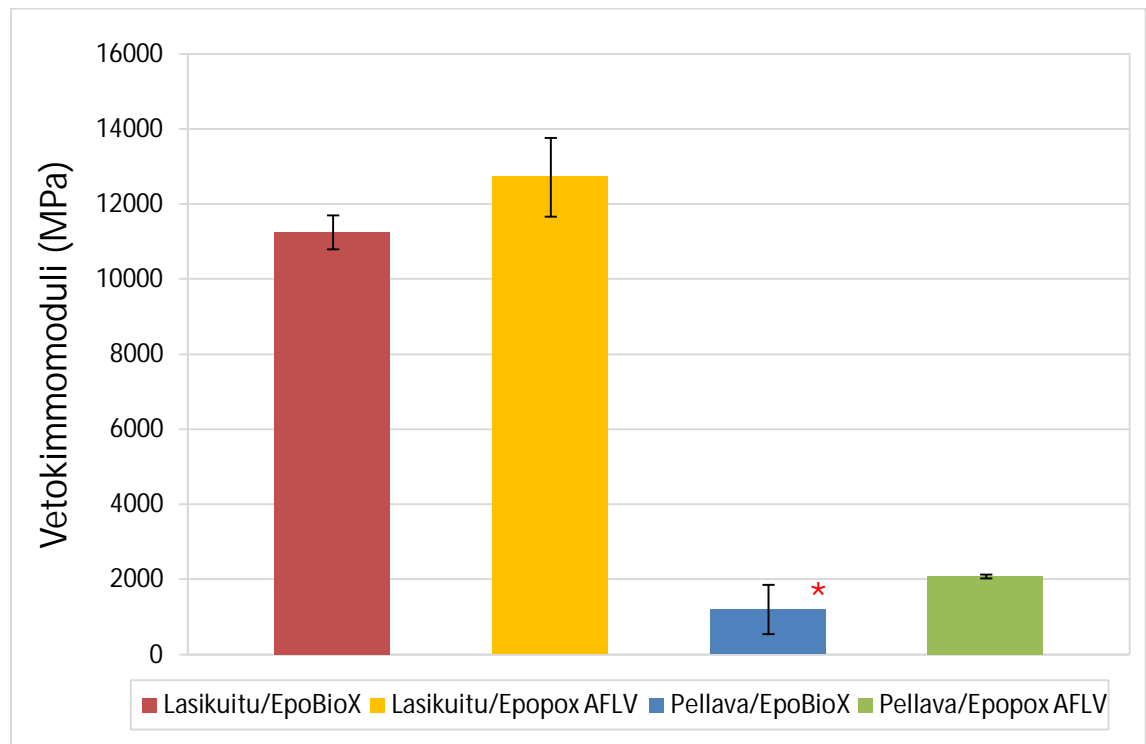
Liitteeseen 4 on kerättyä vetokokeesta saatu data. Vetolujuus on suurin jännitys vedon aikana. Tässä tapauksessa se on myös komposiittien murtolujuus. Lähes kaikki koekappaleet murtuivat vetoleukojen läheisyydestä, joten vetolujuuden (murtolujuuden) arvot eivät ole luotettavia. Pellava/EpoBioX -testikappaleille saatiin vain yksi onnistunut mittaus (mittaus nro 2). Näin ollen ei ole tietoa tuloksen oikeellisuudesta. Kuvassa 8.5 on esitetty vetolujuusarvot pylväsdiagrammina komposiiteille. Tuloksiin tulee kuitenkin suhtautua varauksella. Kuvasta nähdään, että pellavakomposiittien aksiaaliset vetolujuusarvot ovat alhaiset. Tämä selittyy hartsin ja kuidun välisellä heikolla adheesiolla. Hartsia ei ole tarpeeksi pitämään kuituja kiinni toisissaan.



Kuva 8.5. Aksiaalisesta vetokokeesta lasketut vetomurtolujuudet. (* Vain yksi onnistunut mittaus)

Vetokimmomoduli määritettiin 0,05-0,25 % venymän alueelta. Arvoja voidaan pitää suhteellisen luotettavina. Tosin Pellava/EpoBioX -komposiitille saatiin vain yksi onnistunut mittaus, joten siihen tulee suhtautua varauksella. Kuvassa 8.6 on esitettyä vetokimmomoduliarvot pylväsdiagrammina. Keskihajonta on virhepalkkeina pylväissä. Lasikuitukomposiittien kimmomoduliarvot ovat EpoBioX-hartsilla 11,3 GPa ja Epopox AFLV -hartsilla 12,7 GPa. Pellavakomposiiteille arvot ovat 1,2 GPa EpoBioX -hartsilla ja 2,1 GPa Epopox AFLV -hartsilla. EpoBioX -hartsille on ilmoitettu (ks. luku 6.1.1) kimmomodulin arvoksi 2-3,2 GPa. Standardiepokseille kimmomoduliarvot ovat yleensä noin 2,5-4 GPa. [63] Näin ollen pellavakomposiiteilla jäädään jopa näistä arvoista. Kuituja vastaan poikittainen vetokoe kertoo nimenomaan sen, kuinka hyvin

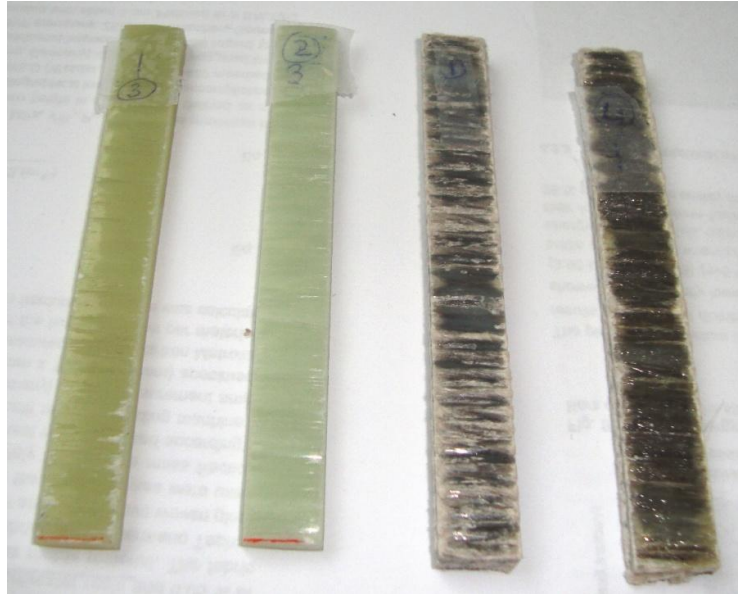
kuidut ovat kostuneet ja millainen on hartsin adheesio kuituihin. Jos kostuminen on heikkoa, matriisihartsi ei pysty muodostamaan yhtenäistä aluetta kuitujen läpi ja kuidut irtoavat helposti toisistaan vedossa. Jos taas adheesio on heikkoa, hartsin ja kuidun välinen rajapinta on heikoin kohta. Pellavakomposiittien tapauksessa sekä kostuminen että adheesio ovat ilmeisesti heikkoja. Lasikuitukomposiittien vetokimmomoduli on huomattavasti suurempi kuin lujittamattoman epoksin. Kun adheesio ja kostuminen ovat riittävät, myös ± 45 -kuitukerros tuo komposiitille lujuutta vedon suunnassa.



Kuva 8.6. Vetokokeesta lasketut vetokimmomodulit (* Vain yksi onnistunut mittausta)

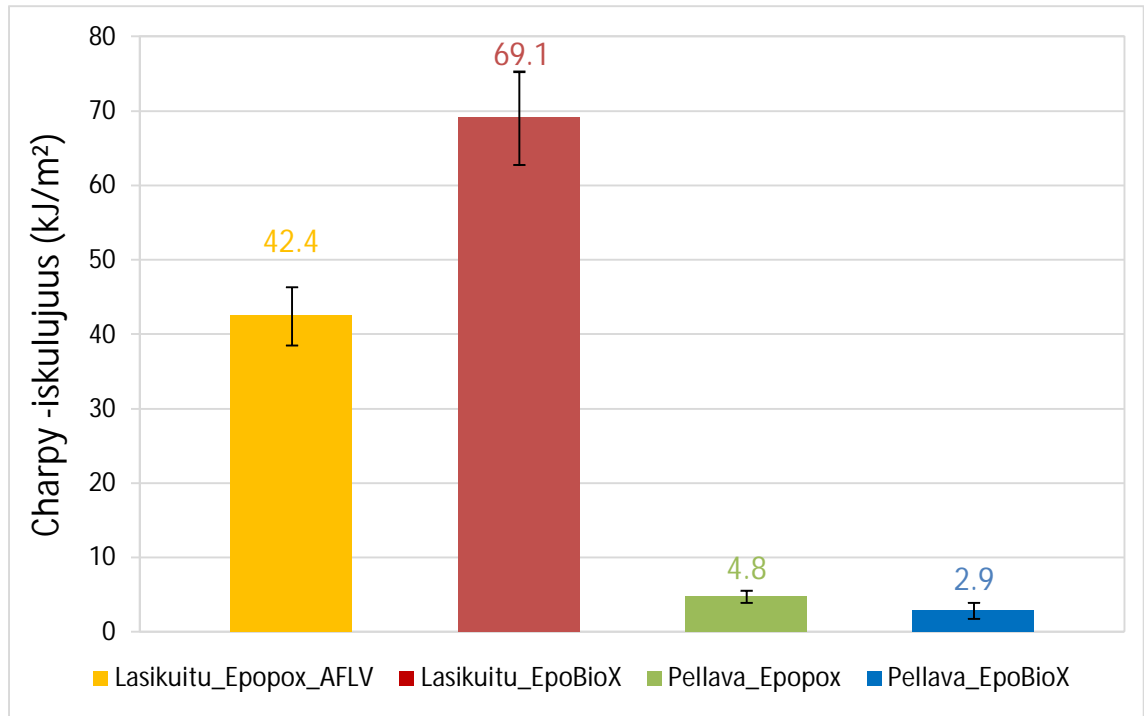
8.4. Iskulujuus

Iskukokeet suoritettiin kappaleessa 7.3 esitetyllä tavalla. Kuvassa 8.7 on esitetty testattavia koekappaleita. Pellavakoekappaleiden sahausreunan läheisyydessä olevat pintakuidut irtosivat hieman rakenteesta työstössä, mutta tätä ei voida täysin välttää kuitujen ollessa melko kuivia. Tällä voi olla jonkin verran vaikutusta pellavakomposiittien iskulujuusarvoihin.



Kuva 8.7. Lasikuitu- ja pellavakoe-kappaleet iskukokeessa.

Kuvassa 8.8 on esitetty koe-kappaleiden Charpy-iskulujuudet pylväsdiagrammina. Keskihajonta näkyy virhepalkkina pylväissä. Kuvaajasta huomataan, että lasikuitukomposiittien iskulujuusarvot ovat suuria verrattuna pellavakomposiitteihin. Lasikuidun tapauksessa näyttäisi, että EpoBioX-hartsilla kostutetut kuidut kestävät paremmin iskuja. Pellavakomposiittien tapauksessa erot ovat niin pieniä ja hajonta suurta, että selviä johtopäätöksiä ei voida vetää. Molemmilla pellavakomposiiteilla iskuominaisuudet ovat kuitenkin heikot. Tuloksiin täytyy kuitenkin suhtautua hieman varauksella, sillä testattavia koe-kappaleita oli vain 3 materiaalia kohden. Liitteestä 3 voidaan kuitenkin nähdä, että iskuenergiat olivat kaikille saman materiaalin kappaleille suunnilleen samaa luokkaa. Pellavakomposiittien iskulujuusarvot olisivat varmasti jonkin verran korkeammat, jos kostumista ja adheesiota voitaisiin parantaa. Tulokset ovat kuitenkin samansuuntaisia, mitä on todettu aikaisemmin kirjallisuudessa. Lasikuitukomposiittien iskuominaisuudet ovat luonnonkuitukomposiitteihin verrattuna ylivoimaisia.

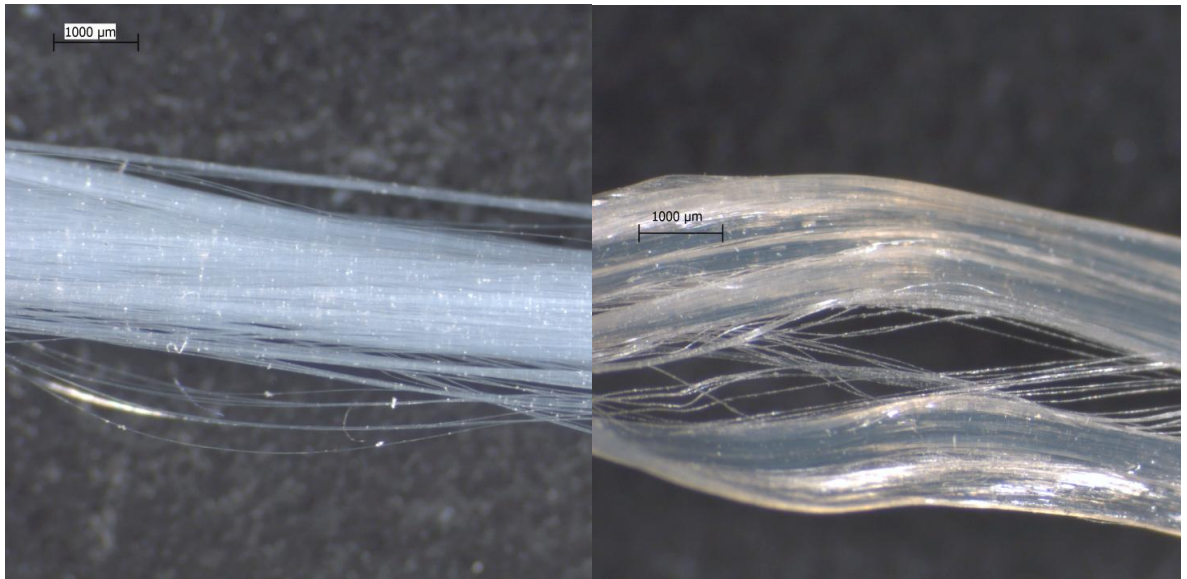


Kuva 8.8. Koekappaleiden Charpy-iskulujuudet α_{CU} (kJ/m^2).

8.5. Mikroskooppinen tarkastelu

8.5.1. Optinen mikroskopia

Optisella stereomikroskoopilla tarkasteltiin kuivia ja hartsilla kostutettuja kovettuneita luonnonkuitulankoja. Kuvassa 8.9 on viskoosilanka ennen kelauskoneen kostutusallasta ja kostutusaltaan jälkeen. Kuvaa tarkasteltaessa näyttää, että langassa on paljon hartsia. Ilmeisesti hartsia on runsaasti vain langan pinnalla, sillä valmiissa viskoosiputkessa kovetuksen jälkeen lanka vaikuttaa hyvin kuivalta. Kelauskoneen kostutusaltaan rullat painavat langan litteäksi ja avoimeksi, jolloin hartsia pääsee hyvin sisälle lankaan, kun siinä ei lisäksi ole yhtään kierteisyyttä. Lopullisen tuotteen hartsipitoisuus ei kuitenkaan ollut riittävä. Joko adheesio on heikko tai viskoosikuidut ovat pakkautuneet niin lähekkäin, että hartsia ei pääse yksittäisten kuitujen väliin.



Kuva 8.9. Viskoosilanka kuivana ja hartsilla kostutettuna kelauskoneen kostutusaltaan jälkeen.

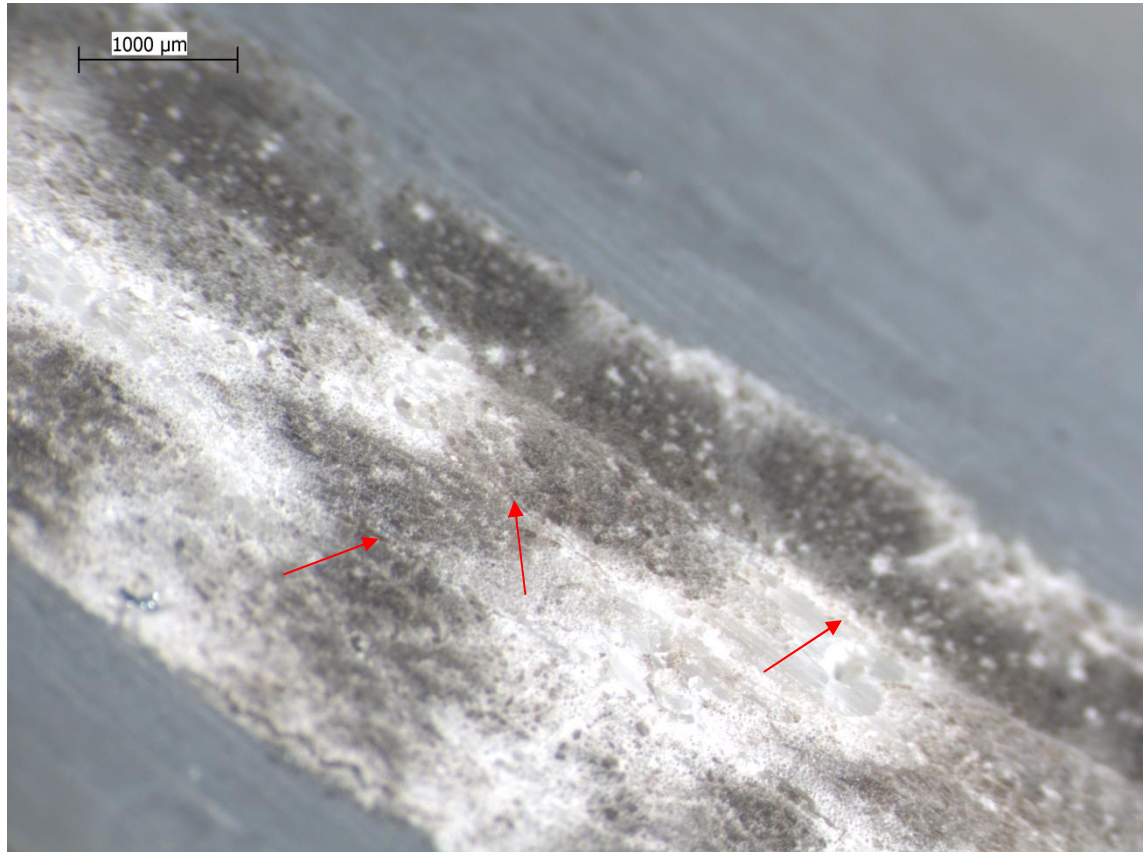
Kuvassa 8.10 on kuiva ja hartsilla kostutettu pellavalanka. Pellavalanka ei ole yhtä tasaista ja sileää kuin viskoosilanka. Lisäksi se on paksumpaa kuin viskoosilanka. Lanka kuitenkin kuljettaa hartsia mukanaan kostutusaltaalta muotille, mikä nähdään siitä, että yksittäisissä kuiduissa on hartsipisaroita. Lanka ei kuitenkaan kostu kovin hyvin sisältä, sillä joissakin kohdissa (kuten kuva 8.10b) voidaan nähdä vaaleampia kohtia kostutetussa langassa. Tämä saattaa johtua siitä, että lanka ei avaudu täydellisesti kostutusaltaan rullilla, sillä langassa on oltava hieman kierrettä.



Kuva 8.10. Pellavalanka kuivana ja hartsilla kostutettuna kelauskoneen kostutusaltaan jälkeen.

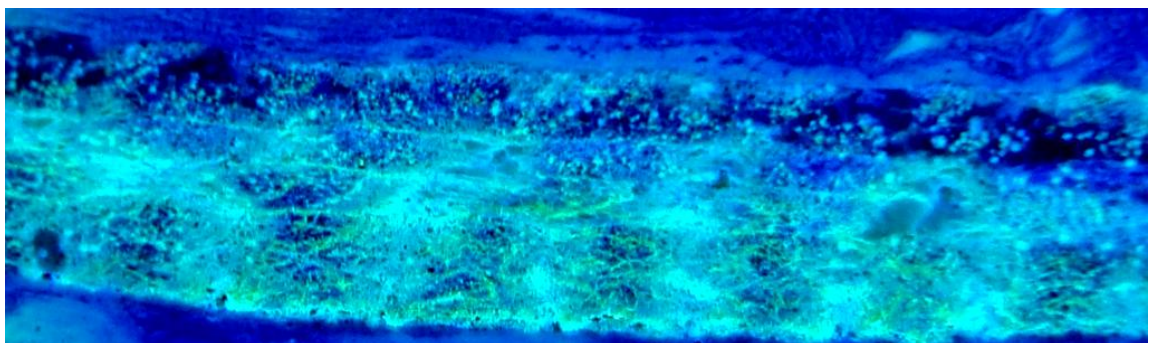
Tutkittiin lisäksi pellava/Epox AFLV poikkileikkausta. Tutkittavan poikkileikkauksen ympärille valettiin epoksia ja pinta hiottiin. Aluksi yritettiin hioa näytettä kuivana, mutta komposiitin poikkileikkaus tukkeutui hartsista. Jouduttiin siis käyttämään märkähiontaa ja kuivata näyte uunissa 50 °C:ssa. Kuvassa 8.11 on

stereomikroskooppikuva pellava/Epopox AFLV komposiittirenkaan poikkileikkauksesta. Kuvan nuolet osoittavat komposiittirakenteen adheesioltaan heikoimmat kohdat. Rajapinnoissa, joissa kuidun suunta vaihtuu, oli nähtävissä stereomikroskoopilla 16-kertaisella suurennoksella tarkasteltaessa rakoja, joihin vesi oli hionnassa päässyt tunkeutumaan. Vetokokeissakin nähtiin, että komposiitit vaurioituivat lähinnä delaminoitumalla.



Kuva 8.11. Stereomikroskooppikuva pellava/Epopox AFLV näytteen poikkileikkauksesta hionnan ja kuivauksen jälkeen. Rajapinnat 90°, +45°, -45° ja 90° kerrosten välillä.

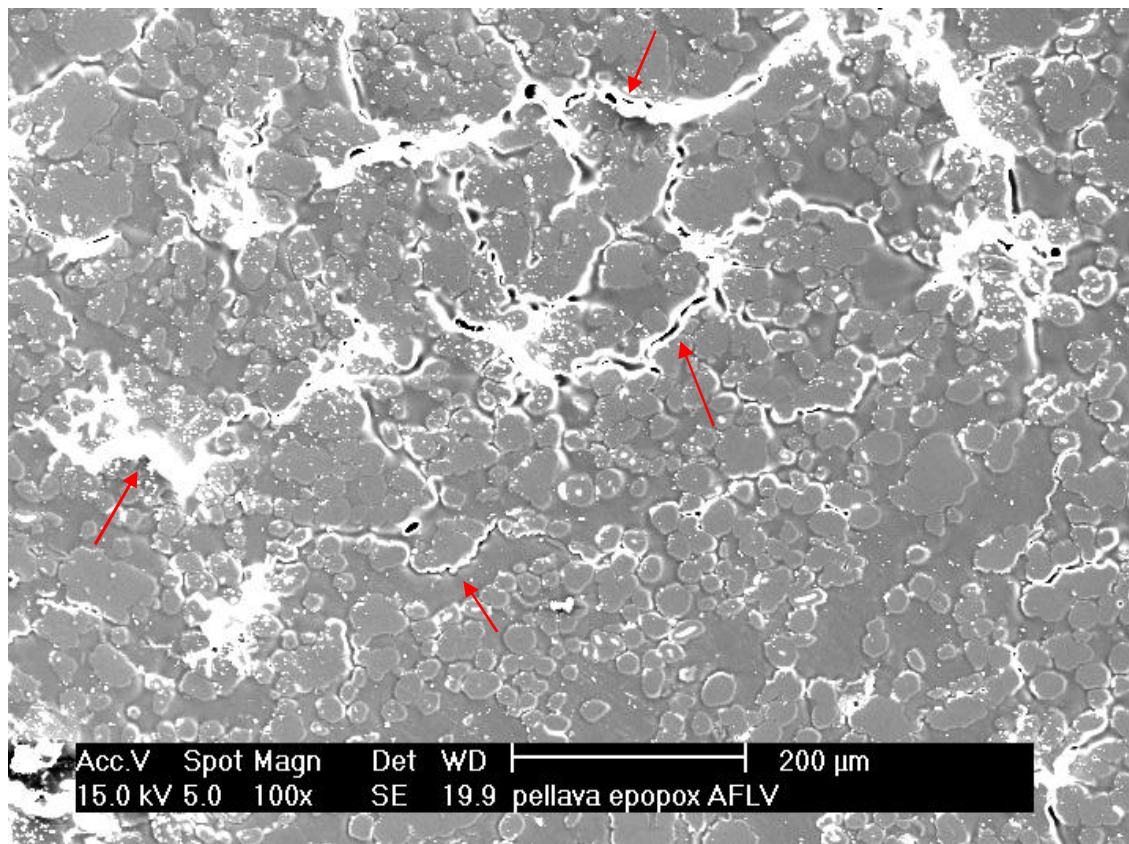
Tämän jälkeen pinta peitettiin fluoresoivalla tunkeumanesteellä ja annettiin vaikuttaa 10 minuuttia. Pinta pyyhittiin nesteestä ja sitä tarkasteltiin ultraviolettivalossa. Kuvassa 8.12 on sama poikkileikkaus kuin edellisessä kuvassa fluoresoivan käsittelyn jälkeen. Nähdään, että tunkeumanestettä on imeytynyt pinnalta rakenteeseen runsaasti. Erityisen paljon sitä on eri suuntiin kelattujen kuitukerrosten välissä sekä kuivissa kohdissa.



Kuva 8.12. Pellava/Epopox AFLV poikkileikkaus tunkeumanestekäsittelyn jälkeen.

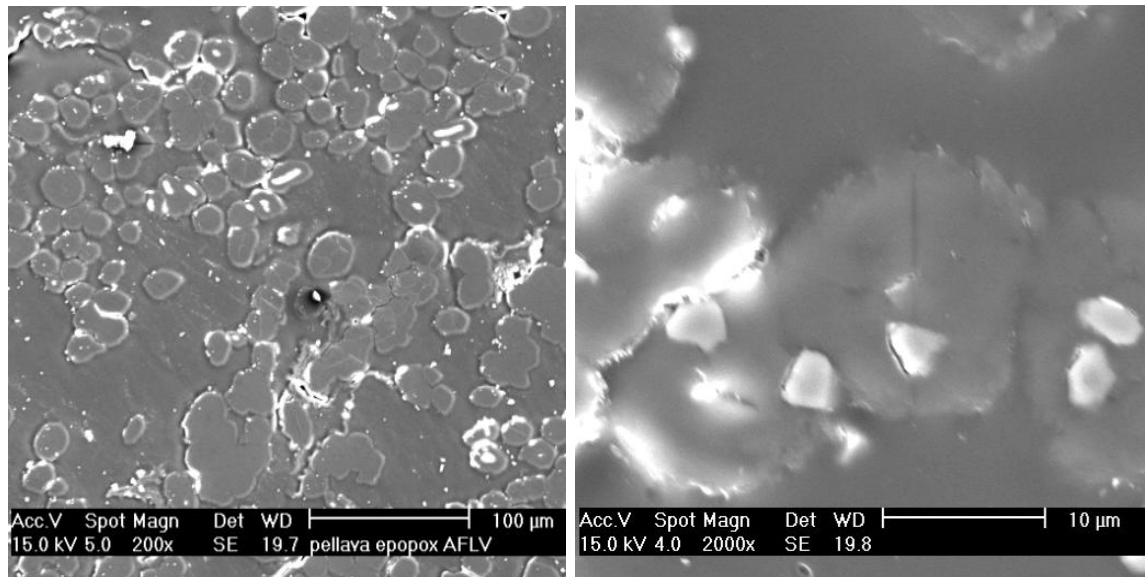
8.5.2. SEM-kuvat

Pellava- ja viskoosiputkista otettiin näytteet SEM-kuvausta varten. Kuvassa 8.13 on pellava/Epox AFLV näytteestä SEM-kuva, jossa voidaan nähdä kuitujen päitä. Kuvassa näkyy myös vaaleita varautuneita alueita, joissa on huokoisuutta. Huokoisissa kohdissa adheesio on heikkoa. Kuvassa muun muassa keskellä alhaalla näyttää kuitenkin olevan kohtia, joissa varautumista on vähemmän. Näyttää siltä, että tässä kohdassa hartsia olisi suhteellisen paljon ja adheesiokin vähintään kohtuullinen. Komposiitin hajoaminen tapahtuu kohdissa, joissa adheesio on heikointa. Yleensä nämä kohdat ovat eri suuntaan kelattujen kuitujen rajapintoja.



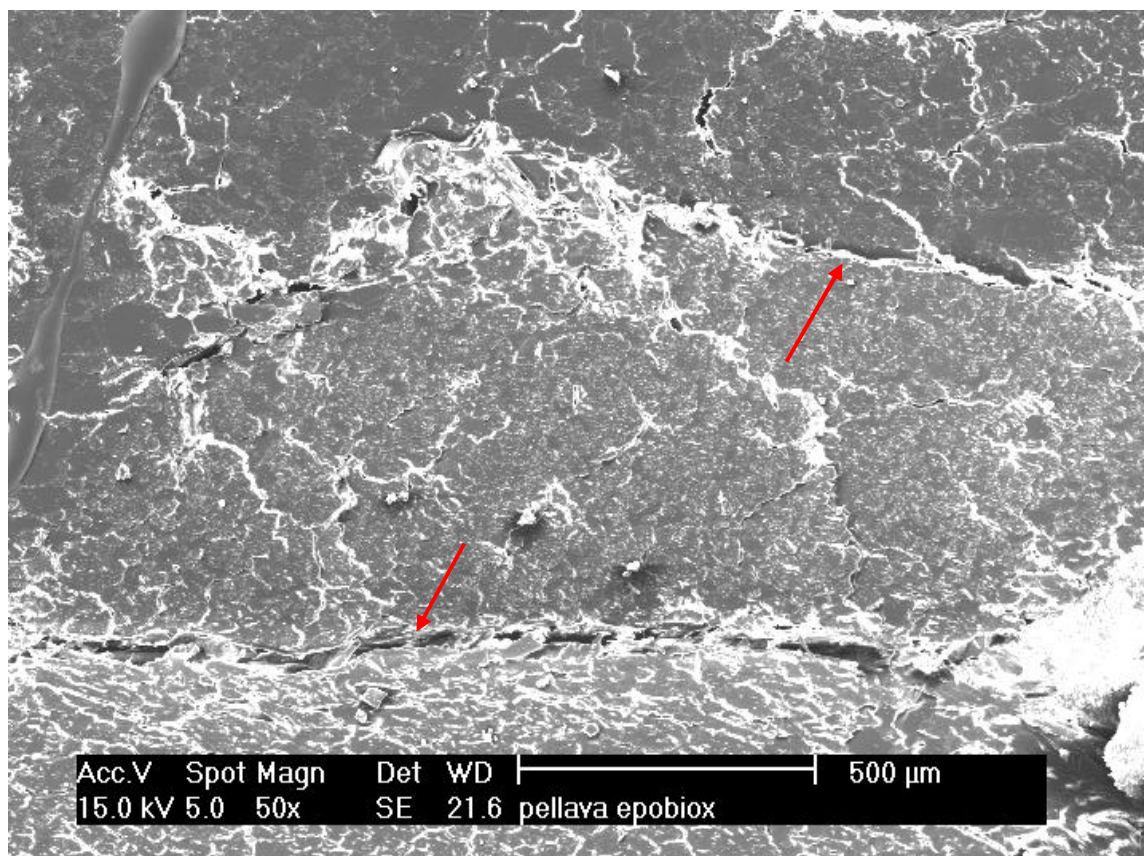
8.13. SEM-kuva pellava/Epox AFLV –kappaleesta. Nuolet osoittavat varautuneita kohtia, joissa on huokoisuutta. Suurennos 100-kertainen.

Kuvassa 8.14 on 200- ja 2000-kertaiset suurennokset pellava/Epox AFLV kappaleesta. Vasemman puoleisessa kuvassa näkyy kuituryppäitä ja hartsialueita. Hartsia vaikuttaisi olevan ainakin kuvan alueella runsaasti. Oikealla olevassa kuvassa näkyy keskellä yksittäinen kuitu, jonka adheesio vaikuttaa kuvan perusteella olevan hyvä ympäröivään hartsiin.



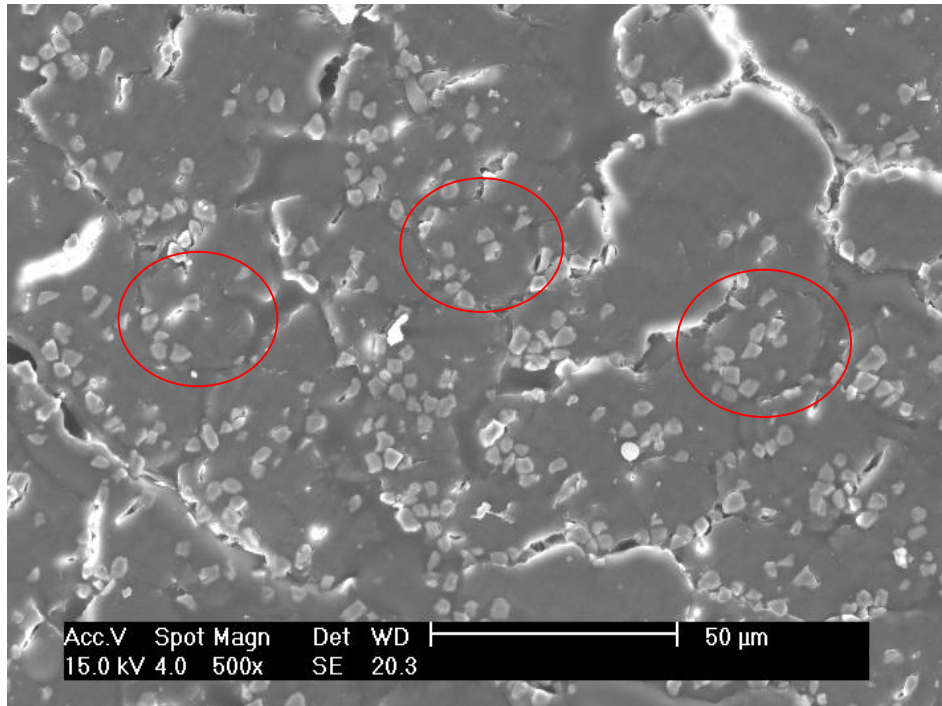
Kuva 8.14. Suurennoksia pellava/Epox AFLV –kappaleesta. Oikealla näkyvillä yksittäinen kuitu. Suurennokset 200- ja 2000-kertaisia.

Kuvassa 8.15 on SEM-kuva pellava/EpoBioX komposiitinäytteestä. Kuvassa voidaan nähdä eri suuntiin kelatut kuitukerrokset ja niiden rajapinnat. Ylhäällä on 90-suunnassa kelattu kerros ja alimmat kerrokset ovat ± 45 -kerroksia. Kerrosten rajapinnalla on paljon huokoisuutta.



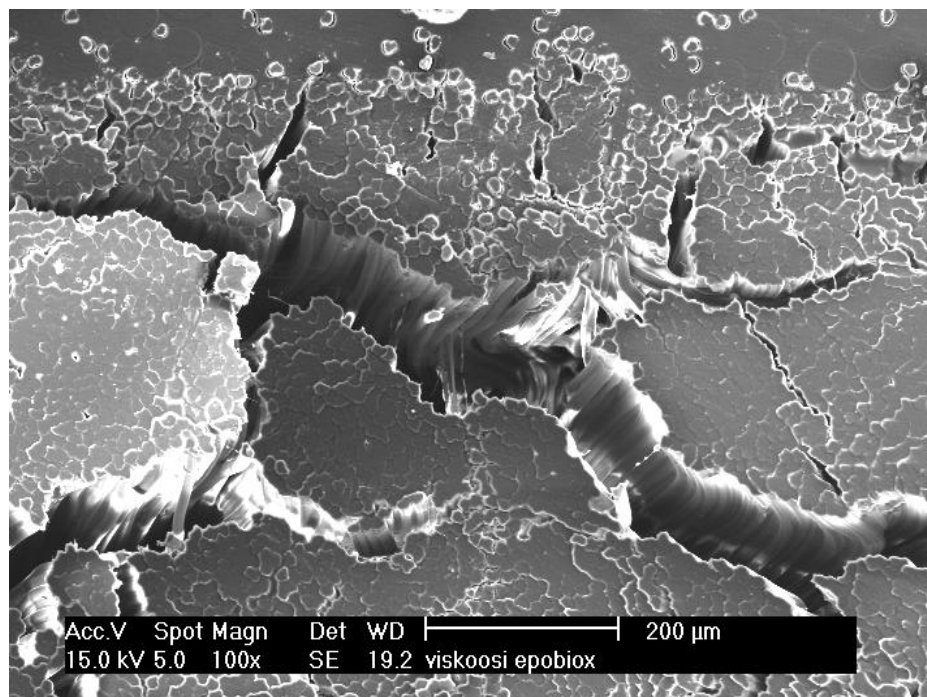
Kuva 8.15. SEM-kuva pellava/EpoBioX näytteestä. Kuvassa nähtävissä eri suuntiin kelatut kuitukerrokset. Kerrosten väliset rajat osoitettu nuolilla. Suurennos 50-kertainen.

Kuvassa 8.16 on suurennos pellava/EpoBioX näytteestä. Kuva on otettu ± 45 -alueelta, joten se ei ole yhtä selkeä kuin esimerkiksi kuva 8.12, mutta kuvasta on erotettavissa yksittäisiä kuidun päitä. Adheesiosta on vaikea päätellä mitään kuvan perusteella.



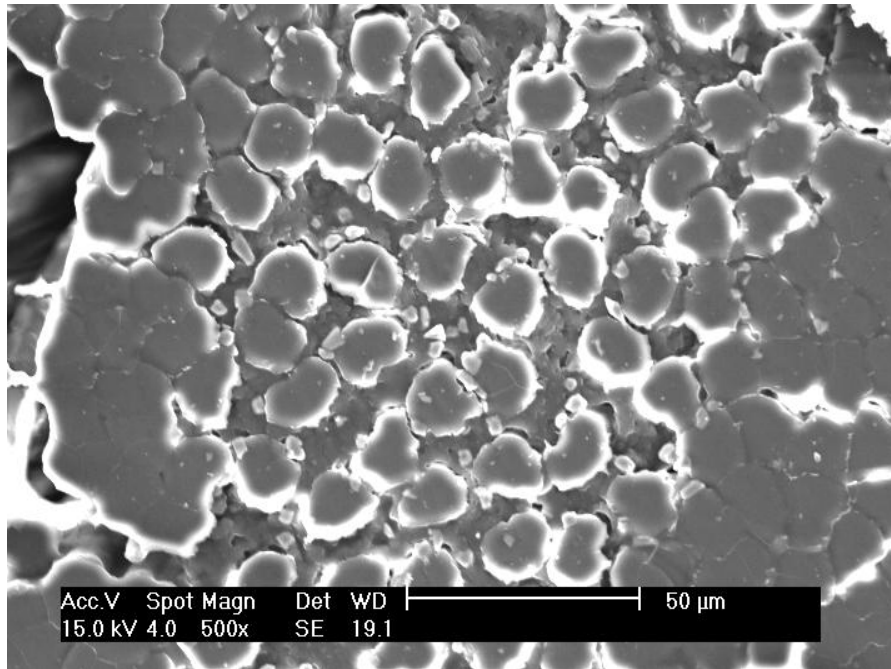
Kuva 8.16. Suurennos pellava/EpoBioX näytteestä. Kuvasta on nähtävillä yksittäisiä kuidun päitä, jotka ympyröity. Suurennos 500-kertainen.

Kuvassa 8.17 on SEM-kuva viskoosista. Nähdään, että adheesio on erittäin heikkoa. Rakenteessa on suuria repeämiä, jotka ovat tulleet SEM-näytteen valmistuksessa. Kuidut ovat pakkautuneet hyvin lähekkäin ja hartsia ei ole kuvassa nähtävissä juuri ollenkaan.



Kuva 8.17. SEM-kuva viskoosi/EpoBioX näytteestä. Suurennos 100-kertainen.

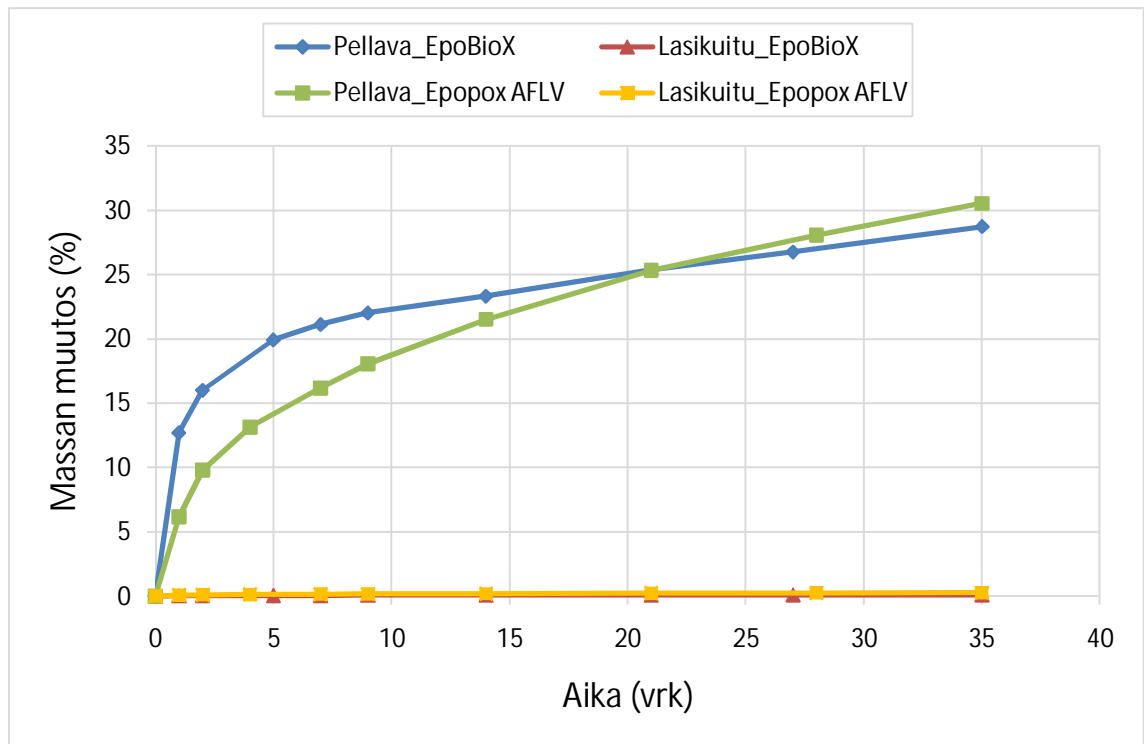
Kuvassa 8.18 on suurennos edellisestä kuvasta. Nähdään, että kuidut ovat pakkautuneet paikoittain erittäin tiheästi. Ilmeisesti hartsia ei pääse tunkeutumaan kuitujen väliin riittävästi, jolloin adheesio jää heikoksi.



Kuva 8.18. Suurennos viskoosi/EpoBioX näytteestä. Suurennos 500-kertainen.

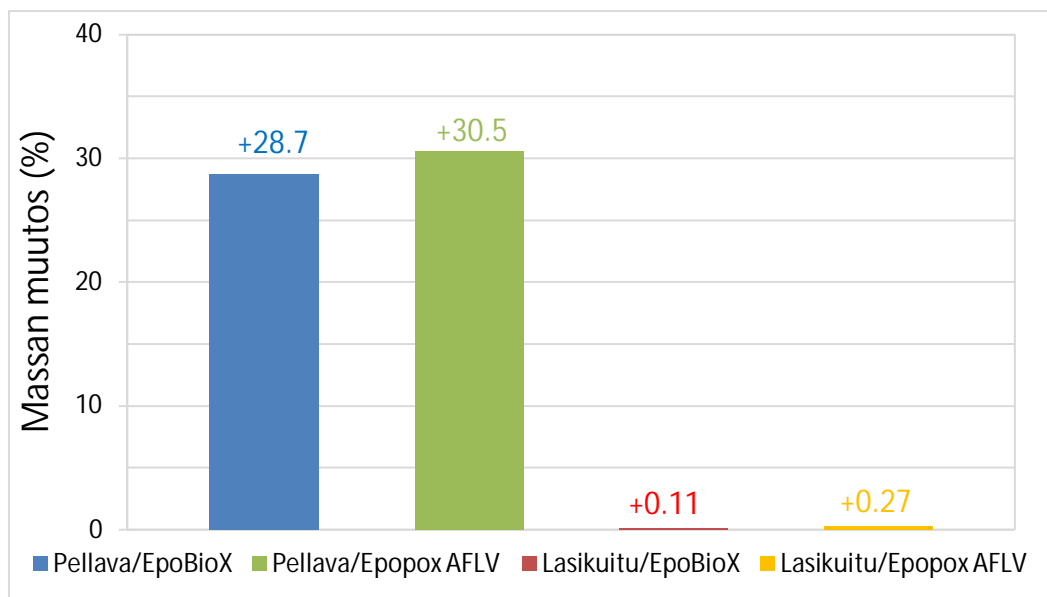
8.6. Veden absorptio

Veden imeytymistä komposiittiputkiin testattiin upottamalla testikappaleita veteen ja tutkimalla muuttunutta massaa tietyin väliajoin. Kuvassa 8.19 on esitetty imeytyneen veden määrä painoprosenteina ajan suhteen. Kuvasta huomataan, että pellavakomposiitteihin imeytyy jo muutaman vuorokauden aikana runsaasti vettä. Lasikuitukomposiitit vastaavasti eivät absorboi vettä juuri ollenkaan pitkänkään ajan kuluessa. Hartsien vaikutuksesta veden absorptioon ei voida vetää yksiselitteisiä johtopäätöksiä. Pellavakomposiittien tapauksessa EpoBioX-komposiitit imivät testauksen alussa enemmän vettä kuin Epopox-komposiitit. Tästä voitaisiin päätellä, että EpoBioX-hartsin hydrofiilisempänä matriisina absorboisi myös vettä. Testiajanjakson lopussa Epopox-hartsilla kovetetut kappaleet kuitenkin menivät veden absorptiossa EpoBioX-kappaleiden ohi. Tämä voi kuitenkin johtua siitä, että Epopox-kappaleet turposivat upotuksen aikana rajummin ja vettä pääsi tunkeutumaan kappaleiden sisään helpommin. Sama johtopäätös ei kuitenkaan päde lasikuitukomposiittien tapauksessa, sillä Epopox-matriisin koekappaleet absorboivat hieman enemmän vettä. Lasikuitukomposiittien tapauksessa liikutaan kuitenkin hyvin pienissä absorptiomäärissä ($< 0,3\%$), joten poikkeavuuden syytä on vaikeampi ennustaa. Ero absorptiossa voi johtua vain mittausvirheestä.



Kuva 8.19. Näytekkappaleiden massan muutos (%) ajan suhteen.

Kuvassa 8.20 on vielä vertailtu näytekkappaleiden massassa tapahtunutta muutosta 35 vuorokauden jälkeen veteen upotuksesta. Epopox-pellavakomposiittikappaleet ovat absorboineet vettä jopa 30,5 % painostaan, kun vastaavat arvo lasikuitukappaleille on vain 0,27 %. Yleisesti voidaan sanoa, että pellavakuitu on hyvin hydrofiilistä. Veden absorptiota saattaa myös lisätä se, että pellavakuidut eivät ole täysin kostuneita. Näin ollen komposiitin sisään on voinut jäädä hartsittomia alueita, joihin vesi pääsee hyvin imeytymään.



Kuva 8.20. Näytekkappaleiden massan muutos (%) 35 vuorokauden veteen upotuksen jälkeen.

Upotuskokeen jälkeen koekappaleita kuivattiin uunissa 50 °C:ssa 24 tunnin ajan. Koekappaleiden massa oli kuivauksen jälkeen suurempi kuin mitä ennen veteen upotusta. Pellavakoekappaleiden massa oli 9,7 % suurempi kuin alussa ja lasikuitukoekappaleiden 0,03 % suurempi. Pellavakomposiittien ulkonäkö muuttui upotuksen aikana (kuva 8.21). Vesi näyttäisi ”syövyttävän” hartsia pois komposiitista. Tämä voi johtua siitä, että pellava imee sisäänään niin paljon vettä, että se turpoaa. Tällöin kuidun ja matriisin rajapinnan sidos heikkenee. Lasikuitukomposiitit säilyivät silmämääräisesti tarkasteltuna muuttumattomina upotuskokeen aikana.



Kuva 8.21. Pellava- ja lasikuitukomposiittikoekappaleet 35 vuorokauden kuluttua veteen upotuksesta.

9. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokeellisen työn tavoitteena oli valmistaa luonnonkuitupohjaisista jatkuvista lujitekuitulangoista kelaamalla komposiitteja ja verrata niiden ominaisuuksia ja toimivuutta perinteisesti käytettyihin teknisiin lasikuitukomposiitteihin. Luonnonkuitupohjaisiksi lujitteiksi valittiin pellava ja viskoosi. Hartseina käytettiin kahta epoksia, biopohjaista ja tavanomaista. Molemmista kuitulangoista voitiin kelaamalla valmistaa putkimaiset kappaleet, mutta viskoosiputkesta ei voitu työstää koekappaleita mekaanisia testejä varten komposiitin rakenteen hajotessa täysin. SEM-kuvista voitiin nähdä, että kuidut olivat pakkautuneet hyvin lähekkäin ja hartsia oli rakenteessa vain vähän. Näyttäisi, että luonnonkuidut jäävät kuiviksi lasikuituun verrattuna. Ilmeisesti hartsin ja kuidun välillä ei ole riittävää adheesiota tai luonnonkuitujen kostumista ei pääse kelausyhteydessä tapahtumaan tarpeeksi tehokkaasti. Pellavakomposiittien rakenne kuitenkin vaikutti suhteellisen jäykältä.

Lasikuitu- ja pellavakomposiiteille tehtiin mekaanisia testejä ja tutkittiin veden absorptiota. Pellavakomposiittien lujuusarvot jäivät lasikuitukomposiittien arvoista, muun muassa rengasvetokokeesta määritetty suhteellinen lujuus oli lasikuitukomposiiteilla 3,5-kertainen verrattuna pellavakomposiittien arvoihin. Tulosta voidaan kuitenkin pitää suhteellisen kelvollisena, sillä aikaisemminkin on pellava- ja lasikuitukomposiiteille määritetty saman suuruusluokan eroja mekaanisissa ominaisuuksissa. Kuituja vastaan kohtisuorassa vedossa eli putken aksiaalisen suunnan vetokokeessa tutkittiin lähinnä hartsin adheesiota kuituihin. Pellavakomposiittien vetokimmomoduli jäi jopa lujittamattomien hartsien kimmomodulista. Tämä kertoo heikosta adheesiosta. Lasikuitukomposiittien vetokimmomoduli oli huomattavasti parempi kuin lujittamattoman hartsin vastaava arvo. Pellavakomposiitit absorboivat huomattavan määrän vettä. Jo kahden päivän kuluttua upotuksesta veteen, pellavakomposiitit olivat absorboineet yli 10 % massastaan vettä. 35 vuorokauden jälkeen veden absorptio oli jopa 30 %. Lasikuitukomposiittien veden absorptio oli hyvin vähäistä pitkänkin ajan kuluessa.

Pellavakomposiittien ominaisuudet jäivät siis jokaisella tutkimusalueella lasikuitukomposiittien ominaisuuksista. Pellavakuiduista onnistuttiin kuitenkin valmistamaan suhteellisen luja jatkuvakuitukomposiitti teknisten komposiittien valmistusmenetelmällä. Kelausta optimoimalla ja hartsin ja kuitujen oikealla valinnalla ja kemiallisella modifioinnilla komposiitin mekaanisia ominaisuuksia voitaisiin mahdollisesti parantaa. Suurin ongelma on hartsin ja kuitujen välinen adheesio. Voidaan melko suurella todennäköisyydellä sanoa, että luonnonkuitukomposiiteilla ei voida saavuttaa lasikuitukomposiittien mekaanisia ominaisuuksia, mutta adheesiota,

valmistusprosessia ja tutkimusta kehittämällä niiden ominaisuuksia voidaan parantaa. Viskoosikuidun ja hartsin välistä adheesiota täytyisi kehittää, jos halutaan valmistaa luja ja jäykkä komposiitti ja tutkia sen mekaanisia ominaisuuksia. Lisää tietoa viskoosin adheesionparantamisesta tarvitaan. Joihinkin sovelluksiin luonnonkuitukomposiittien mekaaniset ominaisuudet ovat riittäviä ja esimerkiksi lisäämällä luonnonkuituja tavanomaisten komposiittikuitujen joukkoon voidaan valmistaa jopa sovellukseen paremmin sopiva hybridikomposiitti.

LÄHTEET

1. Zampaloni M., Pourboghraat F., Yankovich S.A., Rodgers B.N., Moore J., Drzal L.T., Mohanty A.K., Misra M. Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 38(2007)6, pp. 1569-1580.
2. Madsen B. Properties of Plant Fibre Yarn Polymer Composites. An Experimental Study. Report. BYG. DTU. 2004.
3. Pickering K. L. Properties and performance of natural-fibre composites. Boca Raton 2008, Woodhead Publishing and Maney Publishing, CRC Press. 557 p.
4. Mohanty A. K., Misra M., Drzal L. T. Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites. Boca Raton, 2005, CRC Press, Taylor & Francis Group. 875 p.
5. Bono P., Augier L. The availability of vegetable fibre resources. *JEC Composites Magazine*. No. 46 (2009). 34-36.
6. Müssig J. Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications. UK, 2010, John Wiley & Sons, Ltd. 560 p.
7. Bos H.L., Donald A.M. In situ ESEM study of the deformation of elementary flax fibres. *Journal of Materials Science*. 34(1999)13 3029-3034.
8. Baley C., Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites: Part A* 33 (2002) 939–948
9. Baley C. Influence of kink bands on the tensile strength of flax fibers. *Journal of Materials Science*, 39(2004)1, 331-334.
10. Van den Oever M.J.A., Bos H.L., van Kemenade M.J.J.M. Influence of the Physical Structure of Flax Fibres on the Mechanical Properties of Flax Fibre Reinforced Polypropylene Composites. *Applied Composite Materials*, 7(2000)5-6, 387-402.
11. Bos H., van den Oever M., Molenveld K. Flax Reinforced Plastics, the Influence of Flax Fibre Structure on Composite Properties. Lecture [WWW] Proc. Rolduc Polymer Meeting 2004, June 27-30, Rolduc, Kerkrade, the Netherlands. [viitattu 14.10.2010] Saatavissa:
<http://www.agrofibrecomposites.com/Rolduc%202004.pdf>

12. Sparninš E. Mechanical properties of flax fibers and their composites. Licentiate thesis. 2006:60 Luleå University of Technology.
13. Basalt Fibers. [WWW], [viitattu 14.10.2010]. Saatavissa:
<http://www.lbie.com/n3011.htm>,
14. HiPer-tex Rovings. [WWW], [viitattu 14.10.2010]. Saatavissa:
http://www.3b-fibreglass.com/files/docs/3B_HiPer-tex_H20.pdf
15. Dyneema. [WWW], [viitattu 14.10.2010]. Saatavissa:
<http://www.midasglove.com/english/viewforum.php?f=47>
16. General Properties of Steels. [WWW], [viitattu 14.10.2010]. Saatavissa:
http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/steels_properties.cfm
17. Lee S.-Y., Mohan J., Kang I.-A., Doh G.-H., Lee S., Han S.O. Nanocellulose Reinforced PVA Composite Films: Effects of Acid Treatment and Filler. *Fibers and Polymers*. 10(2009)1, 77-82
18. Elices M., Pérez-Rigueiro J., Plaza G.R., Guinea G.V. Finding Inspiration in Argope Trifasciata Spider Silk Fibers. *Journal of Metals JOM* [verkkolehti]. February 2005. The Minerals, Metals & Materials Society (TMS). [viitattu 2.3.2011]. Saatavissa:
<http://www.tms.org/pubs/journals/jom/0502/elices-0502.html>
19. The Structure of Wood. [WWW], [viitattu 23.9.2010]. Saatavissa:
http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/wood/structure_wood_pt1.php
20. Lewin M. *Handbook of Fiber Chemistry*. 3rd Edition. Boca Raton, 2007. CRC Press, Taylor & Francis Group. 1044 p.
21. Wallenberger F. T., Weston N. E. *Natural Fibers, Plastics and Composites*. USA, 2004, Kluwer Academic Publishers. 370 p
22. Baillie C. *Green Composites: Polymer Composites and the Environment*. Boca Raton, 2004, Woodhead Publishing Ltd, CRC Press. 308 p.
23. Fakirov S., Bhattacharyya D. *Handbook of Engineering Biopolymers; Homopolymers, Blends and Composites*. Munich, 2007. Carl Hanser Verlag. 896 p.

24. George J., Ivens J. Verpoest I. Mechanical properties of flax fibre reinforced epoxy composites. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie* 272(1999)1, 41-45.
25. Bos H. L. The Potential of Flax Fibres as Reinforcement for Composite Materials. Thesis. Technische Universiteit Eindhoven, 2004.
26. Van de Weyenberg I., Ivens J., De Coster A., Kino B., Baetens E., Verpoest I. Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites. *Composites Science and Technology* 63(2003)9 1241-1246.
27. Mottershead B., Eichhorn S.J. Deformation micromechanics of model regenerated cellulose fibre-epoxy/polyester composites. *Composites Science and Technology* 67(2007)10. 2150-2159.
28. Callister, Jr. W.D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 6th Edition. USA, 2003. John Wiley & Sons, Inc. 820 p.
29. Goutianos S., Peijs T. Nystrom B., Skrifvars M. Development of Flax Fibre based Textile Reinforcements for Composite Applications. *Applied Composite Materials* 13(2006)4, 199–215
30. Nabi Saheb D., Jog J. P. Natural Fiber Polymer Composites: A Review. *Advanced in Polymer Technology*. 18(1999)4 351-363.
31. Oksman K., Wallström L., Berglund L.A., Filho R.D.T. Morphology and mechanical properties of unidirectional sisal-epoxy composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 84(2002)13, 2358-2365.
32. Mishra S., Naik J.B., Patil Y.P. The compatibilising effect of maleic anhydride on swelling and mechanical properties of plant-fiber reinforced novolac composites. *Composites Science and Technology*. 60(2000)9, 1729-1735
33. Hornsby P.R., Hinrichsen E., Tarverdi K. Preparation and properties of polypropylene composites reinforced with wheat and flax straw fibres. Part II. Analysis of composite microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Science*. 32(1997)4, 1009-1015.
34. Andersen T.L., Plackett D. Polymer composite product, a process for the manufacture thereof and use of the product. International Application Number: PCT/DK02/00085. International Publication Number: WO 02/064670 A1. International Publication Date: 22 August 2002.

35. Roe P.J., Ansell M.P. Jute-reinforced polyester composites. *Journal of Materials Science*. 20(1985)11, 4015-4020.
36. Clemons C.M. Woodfiber-plastic composites in the United States – History and current and future markets. In the *Proceedings of the 3rd International Wood and Natural Fibre Composites Symposium*. Kassel, Germany. September, 2000. p. 1-7.
37. Oksman K. Mechanical properties of natural fibre mat reinforced thermoplastic. *Applied Composite Materials*. 7(2000)5-6, 403-414.
38. Gamstedt E.K., Berglund L.A., Peijs T. Fatigue mechanisms in unidirectional glass-fibre reinforced polypropylene. *Composites Science and Technology*. 59(1999)5, 759-768.
39. Miao M., Finn N. Conversion of Natural Fibres into Structural Composites. *Journal of Textile Engineering*. 54(2008)6 165-177.
40. Mallick P. K. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. 3rd Edition. Boca Raton, 2008. CRC Press. 619 p.
41. Wambua P., Ivens J., Verpoest I. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology* 63(2003)9 1259-1264.
42. Santulli C. Impact properties of glass/plant fibre hybrid laminates. *Journal of Materials Science*. 42(2007)11, 3699-3707.
43. Summerscales J., Dissanayake N.P.J., Virk A.S., Hall W. A review of bast fibres and their composites. Part 1 – Fibres as reinforcements. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 41(2010)10 1329-1335.
44. Ranalli, P., *Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses*. 2007, Springer. 533 p.
45. Joshi S.V., Drzal L.T., Mohanty A.K., Arora S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites: Part A* 35(2004)3, 371–376
46. Zhang L., Miao M. Commingled natural fibre/polypropylene wrap spun yarns for structured thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*. 70(2010)1, 130-135.

47. Fowler P.A., Hughes J.M., Elias R.M. Biocomposites: technology, environmental credentials and market forces. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86(2006)12 1781-1789.
48. Un kayak en fibre de lin. [WWW], [viitattu 6.9.2010]. Saatavissa:
<http://omyp.org/un-kayak-en-fibre-de-lin>
49. Keulemans M. If you dont smoke it, sail it. [WWW]. TUDelta 24 Volume 42. Weekly magazine of Delft University of Technology. [viitattu 6.9.2010].
Saatavissa:
<http://www.delta.tudelft.nl/en/archive/article/if-you-dont-smoke-it-sail-it/1869>
50. Van Vuure A. Natural Fiber Composites; Recent Developments. [WWW], [viitattu 3.11.2010]. Saatavissa:
http://www.i-sup2008.org/presentations/Conference_1/VanVuure_AW.pdf
51. Lin 94 Chair. [WWW], [viitattu 17.9.2010]. Saatavissa:
<http://exhibitions.cooperhewitt.org/Why-Design-Now/project/lin-94-chair>
52. Vanfleteren F. Flax-epoxy prepregs leading the race. *JEC Composites Magazine*. 37(2007), 34-38.
53. Museeuw flax bike launch. [WWW], [viitattu 17.9.2010]. Saatavissa:
<http://www.bikeradar.com/news/article/museeuw-flax-bike-launch-15198>
54. Peters, S.T. Handbook of Composites. 2nd Edition. London 1998, Chapman & Hall. 1118 p.
55. ASM Handbook, Volume 21, Composites. Filament Winding.
56. Peters S. T., Humphrey W. D., Foral R. F. Filament Winding: Composite Structure Fabrication. 2nd Edition. Covina, 2002. SAMPE International Business Office.
57. Fullwood D. Strong B. Insights in Filament Winding for High Quality Composites. *Journal of Advanced Materials* Volume 40(2008)2. pp. 5-16.
58. Sohl, C. Continuous Molding of Thermoset Composites. In: Kelly A. and Zweben C. (ed.) Taljara R. and Manson J.-A. E. (Vol. ed.) *Comprehensive Composite Materials*. Vol. 2. Oxford, UK 2000, Elsevier Science. pp. 845–852.

59. Mazumdar S. K. Composites Manufacturing, Materials, Product, and Process Engineering. Boca Raton 2002, CRC Press. 416 p.
60. Van Rijswijk K., Koussios S., Bergsma O.K. Filament wound container made of natural fibres and rubber: conceptual design. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 217(2003)4 277-286.
61. Lee, S.T. Handbook of Composite Reinforcements. Palo Alto 1993, John Wiley & Sons, Ltd, VCH Publishers, Inc. 767 p.
62. Gohil P. P., Shaikh A. A. Experimental Investigation and Micro Mechanics Assessment for Longitudinal Elastic Modulus in Unidirectional Cotton-Polyester Composites. International Journal of Engineering and Technology 2(2010)2 111-118.
63. Presentation of EpoBioX. [WWW], [viitattu 8.11.2010]. Saatavilla: <http://www.amroy.fi/pdf/Amroy%20Epobiox%20presentation.pdf>
64. Technical Data Sheets. EpoBioX. Epopox AFLV. [WWW], [viitattu 8.11.2010]. Saatavilla: <http://www.amroy.fi/TDS.php>
65. LS-81K. Material safety data sheet. [WWW], [viitattu 8.11.2010]. Saatavissa: <http://www.rbhltd.com/datasheets/LS-81K.pdf>
66. Flax rovings range. [WWW], [viitattu 8.11.2010]. Saatavissa: <http://www.safilin.home.pl/images/stories/safilin/flax%20anglais.jpg>
67. Cordenka, Industrial Yarn Specification. 14.09.2010. Cordenka GmbH. Julkaisemattomat tekniset tiedot. 1s.
68. ASTM D 2290-00. Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method. 2000, ASTM International. 5 s.
69. Heijenrath R., Peijs T. Natural-Fibre-Mat-Reinforced Thermoplastic Composites Based on Flax Fibres and Polypropylene. Advanced Composites Letters. 5(1996)3 81-85.

LIITE 1: KELAUSKONEEN TEKNISIÄ TIETOJA

Kelauskoneen ominaisuudet:

- Neliakselinen kone
- Muotin koko enintään 1,5 m pitkä ja Ø 1 m
- Suurin pyöritysnopeus muotille 100 rpm
- Lineaariakselien huippunopeudet 260 ja 800 mm/s
- Suurin kelauspään pyöritysnopeus 80 rpm
- Kelauspää vaihdettavissa (laippakiinnitys)
- Mahdollisuus kiinnittää mittalaitteita liikkuviin osiin

Kostutusaltaan ominaisuudet:

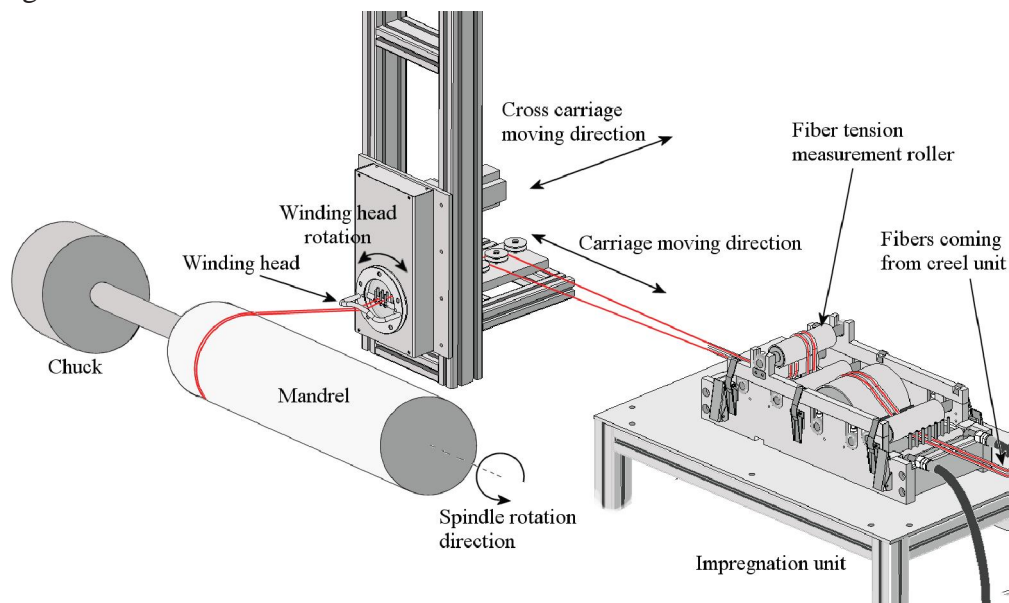
- Rumputyyppinen kostutusallas
- Hartsin lämmönhallinta ja mittaus
- Kuitutouvien jännityksen mittaus
- Mahdollisuus säätää hartsin pyyhinterän asentoa moottoroidusti
- Voidaan käyttää hiili-, lasi- ja aramidikuiduille.

Kuitukaapin ominaisuudet:

- Neljä kuitutouvirullaa, joilla kireysasetus 5 - 30N
- AC-servomoottoreilla toteutettu pyöritys
- Kuitutouvien jännityksen säädössä voidaan käyttää eri tyyppisiä konfiguraatioita

Yleiset ominaisuudet:

- National Instrumentsin liikkeenohjaus- ja mittausjärjestelmä ja ohjelmointi graafisella LabView ohjelmistolla
- Voidaan mitata lämpötiloja, touvien jännityksiä eri kohdissa, nopeuksia. Yhteensä 16 kpl yleiskäyttöisiä 16-bit analogiatuloja ja 2 kpl 16bit analogialähtöjä. Signaalinmuokkaus NI:n SCC-modulien avulla.



TTY:n kelauskone. Kuvan lähde: Berg T., Turto K., Jouppila V., Nurminen N., Jokinen K., Ellman A., Vuorinen J. Kehittyneet kelausteknologiat automatisoituna 3D-komposiittikappaleiden valmistusmenetelmänä (3D FiWi). Projektin loppuraportti. 2006-2009. Tampereen teknillinen yliopisto. s. 16.

LIITE 2: KELAUSKONEEN PARAMETREJA VALMISTETUILE PUTKILLE

Pellava/EpoBioX

Hoop-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Tuotteen leveyden alkuarvo	ba	700.0	mm
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	3.0	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	70.0	rpm
Tuotteen todellinen leveys	b	700.0	mm
Tarvittava kierrosmäärä	k	233.3	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	3.50	mm/s
Touvin liikenopeus	st	0.27	m/s
Touvien kallistuskulma	a	89.25	°
Käytetty touvin määrä	m	53.52	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

Helical-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Tuotteen leveys	b	720.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	3.0	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Touvien kallistuskulma	b	43.99	°
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	30.0	rpm
Tarvittava syklimäärä	k	<u>55.00</u>	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	118.80	mm/s
Pituusakselin liike/kierros	sr	237.61	mm/r
Touvin liikenopeus (max)	st	0.17	m/s
Tuovien etäisyys kehällä	a	4.2	mm
Kulmamuuutos syklin alussa	alfa	6.545	°
Käytetty touvin määrä	m	136.00	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

Pellava/Epopox AFLV

Hoop-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Tuotteen leveyden alkuarvo	ba	700.0	mm
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	2.5	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	50.0	rpm
Tuotteen todellinen leveys	b	700.0	mm
Tarvittava kierrosmäärä	k	280.0	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	2.08	mm/s
Touvin liikenopeus	st	0.19	m/s
Touvien kallistuskulma	a	89.38	°
Käytetty touvin määrä	m	64.22	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

Helical-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Tuotteen leveys	b	720.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	2.5	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Touvien kallistuskulma	b	43.99	°
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	30.0	rpm
Tarvittava syklimäärä	k	<u>66.00</u>	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	118.80	mm/s
Pituusakselin liike/kierros	sr	237.61	mm/r
Touvin liikenopeus (max)	st	0.17	m/s
Tuovien etäisyys kehällä	a	3.5	mm
Kulmamuuutos syklin alussa	alfa	5.454	°
Käytetty touvin määrä	m	163.06	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

Lasikuitu/EpoBioX

Hoop-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Tuotteen leveyden alkuarvo	ba	700.0	mm
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	3.0	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	70.0	rpm
Tuotteen todellinen leveys	b	700.0	mm
Tarvittava kierrosmäärä	k	233.3	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	3.50	mm/s
Touvin liikenopeus	st	0.27	m/s
Touvien kallistuskulma	a	89.25	°
Käytetty touvin määrä	m	53.52	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

Helical-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Tuotteen leveys	b	720.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	3.0	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Touvien kallistuskulma	b	43.990	°
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	30.0	rpm
Tarvittava syklimäärä	k	<u>55.000</u>	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	118.78	mm/s
Pituusakselin liike/kierros	sr	237.57	mm/r
Touvin liikenopeus (max)	st	0.17	m/s
Tuovien etäisyys kehällä	a	4.2	mm
Kulmamuuotos syklin alussa	alfa	6.546	°
Käytetty touvin määrä	m	136.00	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

Lasikuitu/Epopox AFLV

Hoop-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Tuotteen leveyden alkuarvo	ba	700.0	mm
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	3.0	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	50.0	rpm
Tuotteen todellinen leveys	b	700.0	mm
Tarvittava kierrosmäärä	k	233.3	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	2.50	mm/s
Touvin liikenopeus	st	0.19	m/s
Touvien kallistuskulma	a	89.25	°
Käytetty touvin määrä	m	53.52	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

Helical-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Tuotteen leveys	b	720.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	3.0	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Touvien kallistuskulma	b	43.990	°
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	20.0	rpm
Tarvittava syklimäärä	k	<u>55.000</u>	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	79.19	mm/s
Pituusakselin liike/kierros	sr	237.57	mm/r
Touvin liikenopeus (max)	st	0.11	m/s
Tuovien etäisyys kehällä	a	4.2	mm
Kulmamuuotos syklin alussa	alfa	6.546	°
Käytetty touvin määrä	m	136.00	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

Viskoosi/EpoBioX_kelaus1

Hoop-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Tuotteen leveyden alkuarvo	ba	700.0	mm
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	3.0	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	50.0	rpm
Tuotteen todellinen leveys	b	700.0	mm
Tarvittava kierrosmäärä	k	233.3	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	2.50	mm/s
Touvin liikenopeus	st	0.19	m/s
Touvien kallistuskulma	a	89.25	°
Käytetty touvin määrä	m	53.52	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

Helical-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Tuotteen leveys	b	720.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	3.0	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Touvien kallistuskulma	b	43.990	°
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	20.0	rpm
Tarvittava syklimäärä	k	<u>55.000</u>	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	79.19	mm/s
Pituusakselin liike/kierros	sr	237.57	mm/r
Touvin liikenopeus (max)	st	0.11	m/s
Tuovien etäisyys kehällä	a	4.2	mm
Kulmamuuutos syklin alussa	alfa	6.546	°
Käytetty touvin määrä	m	136.00	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

Viskoosi/EpoBioX_kelaus2

Hoop-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Tuotteen leveyden alkuarvo	ba	500.0	mm
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	3.0	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	50.0	rpm
Tuotteen todellinen leveys	b	500.0	mm
Tarvittava kierrosmäärä	k	166.7	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	2.50	mm/s
Touvin liikenopeus	st	0.19	m/s
Touvien kallistuskulma	a	89.25	°
Käytetty touvin määrä	m	38.23	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

Helical-kelaus

Parametri:	Symboli:	Arvo:	Yksikkö:
Mandrelin halkaisija	d	73.0	mm
Tuotteen leveys	b	520.0	mm
Touvin leveys (pinnalla)	w	3.0	mm
Tuovien päällekkäisyys	p	0.0	mm
Touvien kallistuskulma	b	43.990	°
Mandrelin pyörimisnopeus	sm	20.0	rpm
Tarvittava syklimäärä	k	<u>55.000</u>	kpl
Pituusakselin liikenopeus	sx	79.19	mm/s
Pituusakselin liike/kierros	sr	237.57	mm/r
Touvin liikenopeus (max)	st	0.11	m/s
Tuovien etäisyys kehällä	a	4.2	mm
Kulmamuuotos syklin alussa	alfa	6.546	°
Käytetty touvin määrä	m	105.42	m

käyttäjän antamat arvot **lihavoituna**

LIITE 3: ISKUKOKEEN TULOKSET

näyte	paksuus (mm)	leveys (mm)	iskuenergia (J)	Charpy-iskulujuus (kJ/m ²)
L/Pox1	3.32	10.18	1.458	43.139
L/Pox2	3.33	9.79	1.498	45.950
L/Pox3	3.37	9.82	1.265	38.225
			ka	42.438
			hajonta	3.910
L/BioX1	3.63	9.83	2.646	74.153
L/BioX2	3.64	10.05	2.597	70.991
L/BioX3	3.68	9.8	2.238	62.056
			ka	69.067
			hajonta	6.274
P/Pox1	3.48	10.79	0.165	4.394
P/Pox2	3.65	10.6	0.149	3.851
P/Pox3	3.58	10.03	0.188	5.236
P/Pox4	3.6	10.57	0.214	5.624
			ka	4.776
			hajonta	0.802
P/BioX1	3.51	10.81	0.105	2.767
P/BioX2	3.47	10.98	0.154	4.042
P/BioX3	3.45	10.4	0.069	1.923
			ka	2.911
			hajonta	1.067

LIITE 4: AKSIAALISEN VETOKOKEEN TULOKSET

Name	Elastic	Max_Stress
Parameter	.05- .25 %	
Units	MPa	MPa
lasik./epopxR1	11528.5	46.4238*
lasik./epopxR2	13185.2	52.3485
lasik./epopxR3	13461	51.1188*
Mean	12724.9	49.9637
Standard Deviation	1045.25	3.12669
lasikuitu/epobiox-1	10767.3	62.1418
lasikuitu/epobiox-2	11364.9	62.6554*
lasikuitu/epobiox-3	11643.4	55.7527*
Mean	11258.5	60.1833
Standard Deviation	447.631	3.8456
pellava/Epobiox-1	.-	0.28225*
pellava/Epobiox-2	1202.24	3.51247
pellava/Epobiox-3	272.876	1.21353
Mean	737.558	1.66942
Standard Deviation	657.16	1.66267
pellava/epopoxR1	2049.93	7.9215*
pellava/epopoxR2	.-	5.09804*
pellava/epopoxR3	2122.6	9.17564*
Mean	2086.27	7.39839
Standard Deviation	51.3856	2.08852

* murtui vetoleukojen läheisyydestä